Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

MÄRZ 2007 3/07

MEDIZIN
Endlich Impfstoffe gegen Rotaviren

ERDGESCHICHTE
Tod aus der Tiefe

HIRNFORSCHUNG
Das Geheimnis des Mitgefühls

Roboter für jedermann

Microsoft-Gründer Bill Gates über den Einzug mobiler Automaten in unsere Haushalte

6,90 € (D/A) · 13,50 sFr / Luxemburg 8,– €
D6179E

4 194058 406900 03

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Bill Gates will Heimcomputern Beine machen

Heute schon mit Ihrem Roboter geredet? Nein? Gut, aber in wenigen Jahrzehnten könnte dies tatsächlich zum Alltag gehören. In Sciencefiction-Romanen und -Filmen ist das natürlich längst geschehen. Wer denkt nicht gerne an »Hal« (alias IBM), den legendären Raumschiffcomputer in Kubricks »2001: Odyssee im Weltraum«, oder an die beiden Roboterclowns R2-D2 und C-3PO in Lucas' Star-Wars-Serie. Ganz annehmbar fand ich auch die Asimov-Adaption »Der 200-Jahre-Mann« – mit einem humanoiden Maschinenwesen, das vor allem dadurch auffiel, dass es **allzu menschlich und damit offensichtlich defekt** war.

Aber selbst heute schon begegnen wir im Haushalt manch mobilem Burschen. Als Rasenmäher tuckern sie durch edle Vorgärten, als Staubsauger machen sie den Teppich sauber. Weil sie dann doch noch etwas dämlich sind, rempeln sie auch mal an eine Lautsprecherbox oder werfen Opas Ming-Vase um.

Mit Handys oder Waschmaschinen lässt sich im Prinzip bereits reden, auch Kühlschränke könnten eigentlich längst per Internet ihre Vorräte selbst nachbestellen. Kinder bekommen inzwischen zu Weihnachten einen kleinen **Roboterhund** zum Spielen oder einen Robotergefährten von Lego. Etwas weniger verspielt sind Einsätze mobiler Automaten etwa in der Verkehrssicherheit, Altenpflege, Chirurgie oder bei schwierigen Such- und Rettungseinsätzen.

Doch das alles ist nur Vorgeplänkel, glaubt man Bill Gates, dem Mitgründer von Microsoft und Autor unserer Titelgeschichte ab S. 36: So wie unsere Gesellschaft vor drei Jahrzehnten eine PC-Revolution erlebt habe, so stehe sie derzeit an der Schwelle zum **Zeitalter der Hausroboter**. Lediglich fehlende Standards beim Betriebssystem sowie bei den mechanischen Komponenten beklagt der Computerpionier. Menschenähnlich würden wohl nur die wenigsten der künftigen Hausgeister aussehen. Wie schon bei manch anderer Technologie, die sich die Alltagswelt eroberte, werden Roboter, ganz multifunktional, eher in den Hintergrund treten.

Der Gewinner unserer letzten Wunschartikelrunde vom Dezember steht jetzt in dieser Ausgabe: Sie hatten sich mehrheitlich für den Beitrag »Tod aus der Tiefe« von Peter D. Ward entschieden (S. 26). Gewonnen hat diesmal Hans Rudolf von Gunten aus Nussbaumen bei Baden (Schweiz). Die neue Artikelauswahl finden Sie im Inhalt sowie unter www.spektrum.de – mischen Sie wieder mit!

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Neues vom Alter

Liebe auf den dritten Blick.

Wie nah kann man sich kommen, wenn man sich erst im Alter kennen lernt? Eva Weichl und Adam von Campe, 78 und 86, leben mittlerweile Tür an Tür im Augustinum Dießen. Bis dahin war es ein weiter Weg.

Begonnen hat alles mit Spaziergängen am Ammersee, nachdem Herr von Campe Witwer geworden war. Es folgten Besuche von Veranstaltungen im Augustinum und viele Ausflüge. Es war eine „langsame Annäherung", sagt Frau Weichl.

Nur vor dem letzten Schritt hat sie lange gezögert – dem Umzug in die Wohnung direkt neben Herrn von Campe. Bereut hat sie ihn nicht. Wegen des Blicks auf den See – sagt Frau Weichl. Vielleicht ist es auch der Blick auf ihren Lebensgefährten, wenn sie gemeinsam frühstücken oder beim Bauern Milch holen.

Trotzdem bleibt Zeit für persönliche Vorlieben. So betreut Frau Weichl das Gedächtnistraining, und Herr von Campe engagiert sich im Stiftsbeirat. Beide machen es so, wie es im Augustinum üblich ist: Sie respektieren den Freiraum des anderen.

Informieren Sie sich jetzt direkt über Ihre Zukunft im Alter: 21-mal in Deutschland, Telefon 08 00/22 12 34 5 oder www.augustinum-wohnstifte.de

Selbstbestimmt leben. Gut betreut wohnen.

Augustinum

INHALT

SPEKTROGRAMM

12 Müllstrudel im Meer · Fischlarven wittern Heimatduft · Nanopauke aus Graphit · Uralter Tarnungstrick u. a.

15 **Bild des Monats**
Fraktales Delta

FORSCHUNG AKTUELL

16 **Moderne Tarnkappe**
Wie es mit einem raffinierten Gerät gelingt, Dinge unsichtbar zu machen

19 **Kyrills seismischer Fingerabdruck**
Der schwere Orkan ließ auch den Boden erzittern

20 **Wie wir Gesichter erkennen**
Statt Einzelmerkmalen merken wir uns Abweichungen vom Durchschnitt

24 INTERVIEW **Die Zukunft des Klimas**
Klimaforscher Peter Lemke beantwortet Fragen zum neuen IPCC-Bericht

THEMEN

▶ **26** MASSENSTERBEN
Wie die Erde zum Feind des Lebens wurde

▶ **36** TITELTHEMA AUTOMATISIERUNG
Zukunft der Heimroboter

▶ **48** SPIEGELNEURONEN
Wo das Mitgefühl entspringt

58 STRAHLUNGSPULSE
Weißes Laserlicht

66 BIOINFORMATIK
Eine biologische Turing-Maschine

76 BIOPLASTIKEN
Moleküle als Kunstobjekte

84 ASTRONOMIEGESCHICHTE
Ursprünge antiker Sternbilder

▶ **90** ROTAVIREN
Schluckimpfung erprobt

110 ESSAY
Täuschung durch kleine Wahrscheinlichkeiten

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

SEITE 26

WUNSCHARTIKEL: ARTENSTERBEN

Massentod aus dem Meer

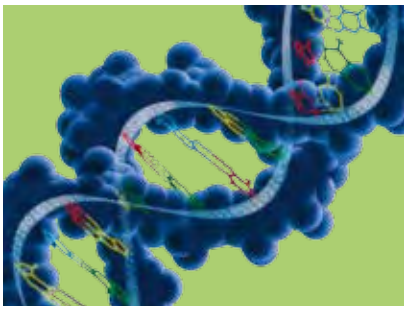
Für die meisten großen Artensterben der Erdgeschichte waren offenbar nicht Asteroideneinschläge verantwortlich, sondern Ozeane, die bei extremer Hitze umkippten

SEITE 48

HIRNFORSCHUNG

Spiegelneuronen im Gehirn

Dank eines speziellen Wahrnehmungsmechanismus verstehen Menschen einander intuitiv. Die Entdecker der Spiegelneuronen beschreiben das Phänomen



SEITE 66

BIOINFORMATIK

Computer aus Molekülen

Eine Mischung aus DNA und Enzymen leistet die Arbeit eines vollwertigen Rechners – in der natürlichen Umgebung einer lebenden Zelle

SEITE 76

KUNST UND WISSENSCHAFT

Skulpturen, geboren aus Biomolekülen

Abläufe und Strukturen im Zellinneren nimmt die New Yorker Bildhauerin Mara Haseltine als Vorlagen für Großplastiken, die einen verblüffend ästhetischen Zugang zur Welt der Biomoleküle eröffnen

TITELTHEMA AUTOMATISIERUNG **SEITE 36**

Roboter im Haushalt

Microsoft-Begründer Bill Gates berichtet über seine Vision des nächsten technologischen Umbruchs: Roboter sollen zu Hause zahlreiche Tätigkeiten erledigen, vom selbsttätigen Rasenmäher bis zum automatischen Altenpfleger

SEITE 84

ASTRONOMIEGESCHICHTE

Wer benannte die ersten Sternbilder?

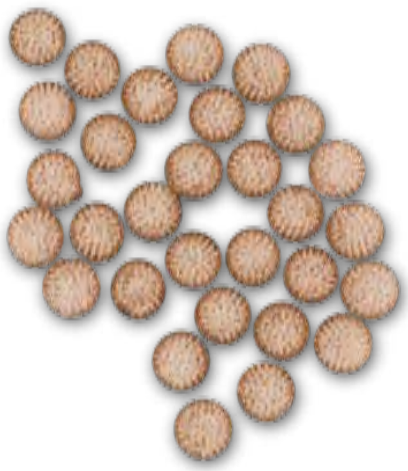
Antike Quellen liefern Hinweise, wann und wo die klassischen Sternbilder entstanden – und welche Bedeutung sie einmal hatten

SEITE 90

MEDIZIN

Impfstoffe gegen Rotaviren

Endlich scheint es möglich, einen Erreger von schwerem Durchfall zu bekämpfen, an dem fast alle Kleinkinder erkranken und viele sterben



KOMMENTAR

22 SPRINGERS EINWÜRFE
Peinliche Befragung

WISSENSCHAFT IM ...

46 **Alltag:** Alt und neu im Faserbrei – Papierrecycling

104 **Rückblick:** Flugsimulator · Zielbrille mit links · Bestätigung des Antiprotons u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

80 **Geisteswissenschaften in die Schulen**

REZENSIONEN

98 **Auf den Schultern von Riesen und Zwergen** von Jürgen Renn
La Tour de 300 Mètres von Gustave Eiffel
Max Born – Baumeister der Quantenwelt von Nancy T. Greenspan
Diesseits von Eden von Rainer Hagencord
Braintertainment von Manfred Spitz (Hg.)

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

106 **Heiße Kurven aus Herzen und Nieren**
Verblüffende Gemeinsamkeiten zwischen Brennkurven und Zykloiden

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Heimcomputer bekommen Beine

8 **Leserbriefe**

10 **Impressum**

109 **Preisrätsel**

114 **Vorschau**

TITELBILD

Sie sieht Robotern aus Sciencefiction-Romanen täuschend ähnlich: die Skulptur *Artform No. 1* (siehe dazu www.zoho.nl)

Titelmotiv: Mark Ho (Robotfigur)
Louis Lemaire (Foto)

Spektrum ONLINE

◀ ASTRONOMIE

Der Sternenhimmel im Jahreslauf

Von Jahreszeit zu Jahreszeit ändert sich der Anblick der Sternenkonstellationen am Nachthimmel, von Monat zu Monat der Lauf der Wandel- zwischen den Fixsternen. Die Sternguckexperten von Astronomie Heute halten Sie auf dem Laufenden www.wissenschaft-online.de/sternenhimmel

---

Das Ergebnis der zweiten Runde:

Asterix reloaded
36,9 %

Roboter als Kugelakrobaten
10,1 %

Der raffinierte Rechenschieber
33,6 %

Massentod aus der Meerestiefe (s. S. 26)
44,0 %

Schmerzbehandlung der Zukunft
23,8 %

Da Mehrfachnennungen möglich waren, addieren sich die Prozentzahlen zu mehr als 100 %.

◀ LESERUMFRAGE

Wunschartikel, die dritte Runde

Zur Auswahl für das Juniheft 2007 stehen diesmal folgende Themen:

- **Baiae – schön, reich und verrucht** Der antike Kurort im Golf von Neapel war angesagt – und anrüchig, weil es manchem Römer dort zu locker zuging
- **Dinosaurier-Massengrab auf Madagaskar** Mit kriminalistischem Gespür fanden die Ausgräber die Ursache für die Anhäufung urzeitlicher Skelette
- **Ein gewichtiges Ding** Das Pariser Urkilogramm definiert die Massenskala – und soll demnächst abgelöst werden
- **Krebs bei Hunden** Von experimentellen Therapien, die den Tieren helfen, beginnen auch Patienten zu profitieren www.spektrum.de/wunschartikel

---

5x5 Die Rezension des Monats von spektrumdirekt

1 • 2 • 3 • 4 • 5

Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■■
Verständlichkeit	■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	24

◀ REZENSION

Johannes Bircher und Karl-Heinz Wehkamp: Das ungenutzte Potential der Medizin

Steigende Kosten im Gesundheitswesen sind nicht die einzige Schwierigkeit, mit der das Heilwesen derzeit zu kämpfen hat. Zur Sicherung ihrer Zukunft benötigt die Medizin ein neues und umfassendes Konzept, das »Meikirch-Modell«, und damit eine neue Definition von Gesundheit und Krankheit *Aus der Rezension von Claudia Borchard-Tuch*

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/5x5

◀ SPEKTRUM-PLUS: ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN

Die Informationsflut in den Griff bekommen

Mit der richtigen Lesetechnik kann man selbst dicke Schmöker im Eiltempo durchpflügen und trotzdem das Wesentliche aufnehmen. Das Prinzip hilft auch, die Flut elektronischer oder konventioneller Post zu bewältigen

Dieser Artikel ist für Abonnenten frei zugänglich unter www.spektrum-plus.de

---

Sie suchen einen Artikel aus einem früheren Heft von Spektrum der Wissenschaft?

Geben Sie auf www.spektrum.de einen oder mehrere charakteristische Begriffe in das Feld »Suche Artikel« ein, wählen Sie unter »Archiv« das gewünschte Heft oder geben Sie dort einen Suchbegriff ein. Alle Artikel ab Januar 1993 sind abrufbar; für Abonnenten kostenlos

PUBLIKATIONEN

zu Themen
in diesem Heft

MASSENEXTINKTIONEN

Tödliche Treffer in Serie

Auch Massensterben vor dem Untergang der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren dürften auf verheerende Einschläge kilometergroßer Meteoriten zurückgehen *(siehe Beitrag auf S. 26)*

SDW DOSSIER 1/2007
Naturgewalten

Bessere Vorhersage von Tsunamis

Manipulation von Wirbelstürmen

Ascheregen aus Supervulkanen

MATHEMATIK

Die Kunst der richtigen Entscheidung

Bei Ungewissheiten sind Fehlentscheidungen unvermeidbar; aber unter bestimmten Voraussetzungen hilft ein neues Verfahren, sie auf ein Minimum zu beschränken *(siehe Beitrag auf S. 110)*
www.spektrum.de/artikel/837745

SDW 6/2005
Heilung nach dem Herzinfarkt

Heilung nach Herzinfarkt

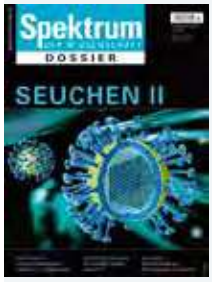
Heiße Tieftemperatur-Supraleiter

Musik manipuliert Hirnneuronen

INFLUENZA

Das Killervirus der Spanischen Grippe

Forscher haben das Genom vom Erreger der bisher schwersten Influenzapandemie rekonstruiert. Was machte ihn so aggressiv? *(siehe Beitrag auf S. 90)*



SDW DOSSIER 3/2006
Seuchen II

Ist die BSE-Gefahr gebannt?

Aids und Malaria

Mythos Pest

Simulierte Pocken

STERNNAMEN

Arabisches am Sternhimmel

Mehr als zweihundert Sternnamen sind arabischen Ursprungs. Manche beruhen auf skurrilen Missverständnissen *(siehe Beitrag auf S. 84)*

SDW DOSSIER 4/2006
Astronomie vor Galilei

Die Himmelsscheibe von Nebra

Von Ptolemäus zu Kopernikus

Die Planetentafeln Zacutos

Diesen Artikel finden Sie als kostenlose Leseprobe im Internet. Unsere Sonder- und Monatshefte sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon: 06221 9126-741

Aufladen an der Steckdose

Hybride auf der Überholspur
November 2006

Immer wieder vermisse ich bei den Stromquellen zur Wiederaufladung von multivalenten Energiespeichern die Erwähnung von Überschüssen aus Windkraftwerken.

Die Stromverkäufer führen an, sie hätten dafür keine Verwendung. So, wie die Überschüsse aus den Atomkraftwerken nachts über Grundstromempfänger in die Niedertarifverbraucher geleitet werden, könnte man über eine zweite Frequenz einen noch darunterliegenden Tarif anbieten – zum Aufladen von Autos, Speichern von Solarheizungen, Hochpumpen in die Speicher von Wasserkraftwerken …

Ich wette, wenn ein solcher Tarif einigermaßen attraktiv gestaltet wird, fällt unserer Wirtschaft noch eine Menge weiterer Möglichkeiten ein. Denken Sie nur, wie schnell die Prozesse umgebaut wurden, als das Beseitigen von Giftmüll nicht mehr kostenlos war. Das Gewinnstreben folgt den Rahmenbedingungen, und die müssen eben richtig gesetzt werden.

Hanspeter Maier, Mörfelden

Antwort des Koautors Dr. R. Löser:
Im Prinzip haben Sie Recht, wenngleich in Ihrer Argumentation einiges durcheinander purzelt: »Stromverkäufer« sind nicht allein die überregionalen Energieunternehmen, sondern auch die Windmüller, die auf Basis der Einspeiseverordnung (Gesetz zur Vergütung erneuerbarer Energien von 2004) ihren Strom abgenommen bekommen. In Spitzenzeiten ist jeder Energiebeitrag willkommen, auch der aus Windkraft. Problematisch wird es dann, wenn dieser Beitrag nicht planbar ist.

Der in großen Kohle- und Kernkraftwerken anfallende Grundstrom versorgt vor allem nachts zum einen die unternehmenseigenen Pumpspeicherwerke, damit diese für Spitzenbelastungen zusätzliche Energie bereithalten, und zum anderen Privat- und Geschäftskunden zum Nachtstromtarif (seit 1.1. 2007 ist mit rund 10 ct/kWh der Kostenunterschied zum Tagstrom allerdings nicht mehr so groß). Der in unserem Beitrag vorgebrachte Vorschlag, Hybridfahrzeuge als Puffer am Netz zu lassen, um dessen Speicherkapazität zu erhöhen, deckt sich mit Ihrem Vorschlag. Im Übrigen liegen Sie mit Ihrer Forderung nach optimalen und verlässlichen Rahmenbedingungen goldrichtig.

Einfluss des Männerbarts

Zum Verlieben schön
November 2006

Auch wenn das Haupthaar nicht als direkter Gegenstand eines Schönheitskriteriums im vorliegenden Artikel fungierte, sondern mehr auf die Mimik abgehoben wurde, wäre unter evolutionistischen Gesichtspunkten zumindest beim Mann ein Einfluss des Bartes im natürlichem Zustand nicht zu ignorieren. Selbst das markanteste Männergesicht würde sich unter einem Bart »verstecken«, es sei denn, dieses korreliere mit seinem Wuchs.

Dr. Frank Subke, Mehlingen

Antwort des Autors Bernhard Fink:
Die meisten Studien zur physischen Attraktivität verwenden Gesichter von Probanden mit »neutralem« Gesichtsausdruck, da selbst ein geringes Lächeln die Attraktivitätsbeurteilung verbessern kann. Auch der Einfluss von Kopf- und Gesichtsbehaarung wird kontrolliert, indem man Haare auf Fotos nachträglich wegretuschiert.

Eine der wenigen Studien über die Bedeutung von Haaren für die Attraktivitätsbeurteilung belegte, dass Männer lange Haare bei Frauen am attraktivsten fanden. Die Autoren dieser Studie interpretierten lange Haare im Sinn des »Handikap-Prinzips« als Qualitätsmerkmal, dass also die Demonstration dieses »Merkmals« auf »gute Gene« der entsprechenden Person hinweist.

Bei Männern wird Gesichtsbehaarung mit sexueller Reife assoziiert, zumal Körperbehaarung unter dem Einfluss des männlichen Geschlechtshormons Testosteron gebildet wird. Amerikanische Psychologen fanden heraus, dass bärtige Männer als aggressiver und dominanter wahrgenommen werden. Eine Glatze hingegen weist eher auf Alter beziehungsweise auf soziale Reife, Lebenserfahrung und damit auch auf Status hin.

VADIM KOZLOVSKY / FOTOLIA.DE

Nach Erkenntnissen amerikanischer Psychologen gelten bärtige Männer als agressiver und dominanter als glatt rasierte.

Die Präferenz mancher Frauen für junge kahlköpfige Männer mit moderater Gesichtsbehaarung könnte demnach eine Reaktion auf beide Signale sein: sexuelle Reife und Lebenserfahrung.

Literatur:

Hairstyle as an adaptive means of displaying phenotypic quality. Von N. Mesko und T. Bereczkei in: Human Nature 15(3), S. 251, 2004

The evolutionary significance and social perception of male pattern baldness and facial hair. Von F. Muscarella und M. R. Cunningham in: Ethology and Sociobiology 17(2), S. 99, 1996

Bedeutung des Glaubens

Vom Glauben zum Wissen und zurück
Essay, Januar 2007

Wissen und Werte

Sehr gut, dass Spektrum die Regensburger Rede aufgegriffen hat. Sie war ein Schlag ins Gesicht des wissenschaftlichen Denkens und der Aufklärung. Denken und humanistische Werte bedingen mehr als Glauben Bescheidenheit vor der Schöpfung.

Dr. Torsten Müller, Berlin

Gott als Lückenbüßer?

Nicht zuletzt die Bemerkung von »Gott als Lückenbüßer« sollte gläubige Menschen, die sich der Vernunft nicht ganz verschließen, dazu anregen, einmal zu durchdenken, welche Lücke Gott in einer fernen Zukunft noch einnehmen wird. Realistische Extrapolation menschlichen Wissens und Verstehens mag zum Ergebnis führen, dass die Lücke auf Dauer komplett verschwindet.

Oder aber selbst eine optimistische Annahme führt zu einer nahezu beweisbaren Lücke, die Gott nicht nur als »Büßer«, sondern zwangsläufig und sinnvollerweise ausfüllt. Anstatt dem aktuellen Wissen immer hinterherzulaufen oder sogar zu versuchen es zu verbieten, wäre das eine proaktive Vorgehensweise. Und das Ergebnis könnte vielen Menschen helfen, denen die reine Vernunft als spirituelle Stütze im Leben zu wenig ist.

Harald Kirsch, Düsseldorf

Begabungen fördern

Wie Genies denken
Januar 2007

Zu wenig Genies in Deutschland

Sorge bereitet mir das lückenhafte und kaum durchdachte Konzept der Ganztagesschule. Der talentierte Schüler, der motiviert ist, mehr können zu wollen als andere, und das besonders, wenn dies auf einem für ihn speziell zugeschnittenem Gebiet ist, kann dies nicht mehr machen, weil ihm keine Zeit dazu gelassen wird. Eine Schachgroßmeisterin zu werden, die von ihrem Vater sechs Stunden täglich trainiert wird, ist in unserem neu geschaffenen und zu schaffenden Schulsystem leider nicht mehr möglich.

Meine Töchter werden ihr Talent im Turnen bald aufgeben müssen, weil sie keine Zeit durch Nachmittagsunterricht und späte Hausaufgaben haben werden, nur um das zu lernen, was nach Ihrem Artikel sowieso weder im Sport noch auf geistigem Gebiet zu großen Leistungen führt.

Auch als Lehrer muss ich immer mehr Zeit in der Schule absitzen, nur um meine schiere Anwesenheit zu bezeugen. Ich werde also auch bald keine Zeit mehr haben, meine Ansprüche im Unterrichten zu steigern, indem ich Ihre Zeitschrift aufmerksam lese, »meine Leistung daraufhin analysiere, Lehren daraus ziehe und meinen Unterricht verbessere«.

Das passiert in einer Bildungslandschaft eines Landes, das angewiesen ist auf das geistige Potenzial seiner Staatsbürger. Eigentlich kann man Bildung kaum noch schlechter angehen, als es im Augenblick von unseren Schulleitern, Beamten der Regierungspräsidiums und unserer Bundesbildungsministerin durchgesetzt wird.

Name und Adresse des Absenders sind der Redaktion bekannt.

Gene und Umwelt

Schachkoryphäen mit Genialität in Verbindung zu bringen ist schon ein Widerspruch in sich. Inzwischen sind die besten Schachcomputer beziehungsweise deren Programme den besten Schachspielern mindestens ebenbürtig. Denken Schachcomputer? Wohl kaum! Insofern verfehlt der Artikel sein Thema. Kreativität, sicherlich ein wesentliches Element von Genialität, ist zwar »nur« ein Faktor – vergleiche Th. A. Edison: 1 Prozent Inspiration, 99 Prozent Perspiration – aber wenn ein Faktor gegen null geht, wird auch das Produkt null und es ergibt sich »Verhältnisschwachsinn« (extreme Sonderbegabung bei sonstiger Minderbegabung). Diesen würde man bei einem Menschen mit den Fähigkeiten eines Schachcomputers diagnostizieren.

Es ist auch in Betracht zu ziehen, dass der Fleiß oder der Antrieb, sich intensiv mit einer Materie zu beschäftigen, ebenfalls zu einem wesentlichen Teil durch Veranlagung/Begabung bedingt ist. Es gibt genügend Beispiele von vergeblichen Bemühungen, Genies oder auch nur Spitzenkönner durch Dressur zu produzieren. So bleibt die fast banale, vielfach bestätigte Einsicht, dass nahezu alle Lebensphänomene – zwar zu jeweils unterschiedlichen Anteilen – durch Gene und Umwelt beziehungsweise Begabung und Erziehung/Milieu bedingt sind.

Prof. Dr. H. Kammermeier, Kaarst

Entwicklung braucht Zeit

Neue Wege zu sicherer Software
Januar 2007

Probleme und ihre Ursachen

Einige Aussagen in diesem Artikel kann ich nicht unwidersprochen lassen. Die von accenture (und nicht, wie im Artikel behauptet von T-Systems) gebaute Internetjobbörse der Bundesagentur für Arbeit hat mit der (von T-Systems als Generalunternehmer verantworteten) Software zur Unterstützung des Arbeitslosengeldes II bis auf den Auftraggeber kaum etwas gemeinsam. Insbesondere zeigten die beiden Projekte jeweils sehr unterschiedliche Problemstrukturen.

Üblicherweise reichen diese Probleme von grundsätzlichen Mängeln im europäischen Ausschreibungsrecht über unrealistische Vorstellungen der Auftraggeber und unklare fachliche Vorgaben bis hin zu Kommunikations- und Managementfehlern und handwerklichen Problemen. Der Artikel adressiert stillschweigend nur die letzte Klasse von Problemen.

Die geschilderte Ursachenkette für den Absturz der Ariane V unterschlägt, dass das Problem auftrat, weil die neue Rakete auf Grund einer flacheren Flugbahn und geänderter Startprozeduren das erprobte Modul mit völlig neuen Bahnparametern betrieb. Zwar war der ge- ▷

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

▷ schilderte Überlauf Auslöser für den Absturz, die Ursache lag jedoch in einer unzureichenden Fehlerbehandlung und in Lücken im Testverfahren, die ihrerseits auf Zeitdruck und Fehlentscheidungen im Management zurückzuführen waren.

Die Vorstellung, Programmierer schrieben zunächst den gesamten Quellcode auf, bevor die ersten Tests gemacht werden, stammt aus den 1970er Jahren. Heutige Verfahren arbeiten schon lange mit abgestimmten Stufen von Teiltests, moderne Verfahren sogar mit einem ständigen Wechsel zwischen Konstruktion und Verifikation, zum Teil mehrmals pro Stunde.

Jens Coldewey, München

Der Heilige Gral wurde gefunden!

So liest sich dieser Artikel: Man muss ein bestimmtes Tool einsetzen und schon hat man fehlerfreie Software. So einfach ist es leider nicht. In der gut dreißigjährigen Geschichte der Softwareentwicklung wurde oft über die schlechte Qualität geklagt und eine Vielzahl von Heilmitteln vorgeschlagen, die bis heute kaum Wirkung gezeigt haben (höhere, objektorientierte Programmiersprachen, CASE-Werkzeuge, strenge Prozesse, agile Methodiken und so weiter). Jeder Fortschritt wurde aufgezehrt durch umfangreichere Funktionen und engere Zeitpläne.

Bei Softwareverifikation im Speziellen gibt es folgende Probleme:

- Entwickler müssen in der formalen Spezifikation geschult werden. Hier gibt es teilweise erhebliche Widerstände.
- Aktuelle kommerzielle Software ist viel zu komplex, als dass verfügbare Werkzeuge den Beweis von Korrektheit in akzeptabler Zeit führen könnten.
- Die Einführung bedeutet eine erhebliche Investition, die vielerorts politisch nicht durchsetzbar ist.

Andere Forscher denken in Zeiträumen von 15 bis 20 Jahren, um diese Technik zu entwickeln.

Gunter Blache, Ludwigsburg

Problem Missmanagement

Der Artikel beschreibt sehr schön, wie sich sehr kurze Stücke Software mit automatisierten Verfahren testen lassen.

Viele Softwareentwickler benutzen bereits solche Verfahren – Stichwort Unit Tests. Die Krux dabei ist nur, ein komplexes Progamm aus kleinen Teilen aufzubauen, die sich isoliert testen lassen. Das erfordert erstens ein gewisses Geschick, das leider nicht jeder Entwickler hat, und zweitens genügend Muße, die es in den meisten Firmen nicht gibt. Man will so schnell wie möglich zumindest die Vorstufe zu einem fertigen Produkt sehen. Das erzeugt einen immensen Druck, der für gründliches Softwaredesign und umfangreiches Testen keine Zeit lässt.

Das Problem in der Softwarebranche sind also nicht fehlende Tools oder schlechte Programmiersprachen – in den letzten zehn Jahren hat sich auf diesem Gebiet ernorm viel getan –, sondern Missmanagement.

Es gibt Unmengen guter Bücher über Projektmanagement in der Softwareentwicklung. Sie werden aber leider meist nur von Entwicklern, nicht von Projektleitern und anderen Führungskräften gelesen. Es ist heutzutage normal geworden, dass man als Entwickler ein besseres Fachwissen hat als der Vorgesetzte. Da nutzen die besten Tools nichts, wenn sie gar nicht oder falsch eingesetzt werden, weil die Führungskräfte nicht auf dem neuesten Wissensstand sind.

Thomas Leichner, München

Errata

Der heiße Ursprung des Lebens
Januar 2007

William Martin ist als ordentlicher Professor am Institut für Botanik III der Universität Düsseldorf kein »Mitarbeiter« von Michael Russell, sondern ein Kollege, der wissenschaftliche Artikel gemeinsam mit ihm veröffentlicht hat.

Die dunkle Ära des Universums
Januar 2007

Um ein Wasserstoffatom im Grundzustand zu ionisieren, braucht man nicht 911 Nanometer, wie fälschlicherweise im Artikel steht, sondern 91,1 Nanometer – das ist die Wellenlänge der so genannten Lyman-Grenze. Das fehlende Komma hat das Photon fälschlicherweise vom Ultraviolett- in den Infrarot-Bereich versetzt.

Magnetisch angezogene Paare, Forschung aktuell, Februar 2007

John Bardeen, Leon Cooper und John Robert Schrieffer publizierten ihre Theorie zur Supraleitung schon 1957. Im Jahr 1972 erhielten sie den Physik-Nobelpreis.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann (Online Coordinator), Ursula Wessels; Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Bernhard Gerl, Dr. Corinna Gilley, Dr. Susanne Lipps-Breda, Prime Ad! Translations AG, Claus-Peter Sesín, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005;
Hamburg: Siegfried Sippel, Brandstwiete 1 / 6.0G, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hartmut Brendt, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2062, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55;
Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49;
München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

UMWELT

Müllstrudel im Nordpazifik

GREENPEACE.DE

Mit den Strömungen im Nordpazifik bewegt sich auch der auf dem Meer treibende Plastikmüll im Kreis.

Im Jahr 1992 fielen von einem Frachter auf dem Weg von Hongkong in die USA 30 000 Plastikspielzeuge in den Nordpazifik. Seither ist für die Kinder in dem Ort Sitka in Alaska alle drei Jahre Bescherung. Dann wird dort jeweils ein Teil der Spielsachen angespült. Wie US-Ozeanograf Curtis Ebbesmeyer nun in einem Modell berechnet hat, fährt das Treibgut im Nordpazifik Karussell. Transportiert wird es vom so genannten subarktischen Wirbel, einer Meeresströmung zwischen Nordamerika und Asien. Laut Ebbesmeyer bewegen sich die Plastikteile mit elf Zentimetern pro Sekunde und kehren nach einer bis zu 13 000 Kilometer langen Reise wieder an den Ausgangspunkt zurück. Für die Runde brauchen sie zwei bis vier Jahre.

Die Plastikteile sind extrem langlebig: Manche halten sich mehrere hundert Jahre, ehe sie zerfallen. Dadurch hat sich im Nordpazifik mittlerweile ein ringförmiger Müllteppich etwa mit dem Umfang Mitteleuropas gebildet. Ursache sind die rund 10 000 Container, die jedes Jahr von Frachtschiffen über Bord gehen, sowie die noch immer übliche Müllverklappung ins Meer.

Eos, 2. 1. 2007, S. 1

PALÄANTHROPOLOGIE

Schädel stützt Out-of-Africa-Theorie

Nach einer heute weithin anerkannten Theorie hat sich der moderne Mensch südlich der Sahara entwickelt und von dort aus vor 65 000 bis 25 000 Jahren den Rest der Welt besiedelt. Einziger Schönheitsfehler dieser »Out of Africa«-Hypothese, für die viele Indizien sprechen: Ausgerechnet aus der fraglichen Zeit fehlten bisher aussagekräftige menschliche Fossilien vom Schwarzen Kontinent.

Ein Schädel, der vor über fünfzig Jahren nahe der südafrikanischen Stadt Hofmeyr gefunden wurde, schließt nun diese Lücke: Ein internationales Forscherteam um Frederick Grine von der Universität Stony Brook (New York) hat ihn auf 36 000 Jahre datiert und zugleich als anatomisch modern klassifiziert. Für eine Altersbestimmung mit der herkömmlichen Radiokarbonmethode enthält das Fossil nicht mehr genügend organisches Material. Deshalb wandten Richard Bailey von der Universität Oxford und seine Kollegen eine verfeinerte Variante der Fluoreszenzdatierung an. Sie ergab die Zeit, seit der Schädel das letzte Mal dem Sonnenlicht ausgesetzt war. Parallel dazu vermaß Katerina Harvati vom Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie das südafrikanische Fossil und europäische Schädel ähnlichen Alters in drei Dimensionen und verglich die Ergebnisse miteinander. Dabei fand sie eine sehr starke Ähnlichkeit. Gemeinsam zerstreuen diese Ergebnisse wohl die letzten Zweifel am afrikanischen Ursprung des Menschen.

Science, 12. 1. 2007, S. 226

FREDERICK E. GRINE UND LUCI BETTI-NASH, MIT FRDL. GEN. DES MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE, LEIPZIG

Der im Jahr 1952 in Südafrika gefundene Hofmeyr-Schädel wurde nun neu datiert und klassifiziert.

VERHALTEN

Fischlarven wittern Heimatduft

Viele Menschen zieht es dorthin zurück, wo sie geboren und aufgewachsen sind. Fischlarven im Riff ergeht es anscheinend nicht anders. Das haben Forscher um Gabriele Gerlach vom Marine Biological Laboratory im amerikanischen Woods Hole (Massachusetts) herausgefunden.

Sie setzten Larven von Doederlein-Kardinalfischen *(Ostorinchus doederleini)* in ein Becken mit verschiedenen Rinnen, die Wasserproben von fünf benachbarten Korallenriffen des australischen Great Barrier Reef enthielten. Obwohl sich die Jungtiere frei bewegen konnten, hielten sie sich meist im Wasser aus ihrem heimischen Riff auf. Offenbar erkannten sie dessen Duft. Wie jedem Haus oder jeder Wohnung haftet schließlich auch einem Riff ein typischer Geruch an, an dem sich die Larven orientieren können. In freier Natur werden sie nach dem Schlüpfen von Meeresströmungen oft sehr weit verfrachtet. Mit ihrer Nase finden sie dann in die heimischen Gewässer zurück.

GABRIELE GERLACH, MBL

Larven des Doederlein-Kardinalfischs haben ein feines Näschen.

Wie gut das funktioniert, bestätigten genetische Untersuchungen durch die Wissenschaftler. Demnach besteht eine deutlich größere Ähnlichkeit unter artgleichen Fischen innerhalb eines Riffs als zwischen Exemplaren aus verschiedenen Riffen. Indem die beobachtete Treue zum angestammten Platz die Bildung lokaler Varietäten begünstig, fördert sie die biologische Vielfalt.

Pressemitteilung des Marine Biological Laboratory Woods Hole vom 8. 1. 2007

BEIDE FOTOS: GEORG OLESCHINSKI, INSTITUT FÜR PALÄONTOLOGIE, UNIVERSITÄT BONN

PALÄONTOLOGIE

Uralter Tarnungstrick

■ Was zufrieden stellend funktioniert, bedarf keiner Veränderung. Dass auch die Natur diesem sinnvollen Prinzip folgt, fanden Paläontologen der Universität Bonn nun an einem ungewöhnlichen Fossil aus der weltbekannten Grube Messel bei Darmstadt bestätigt. Es handelt sich um das weltweit erste versteinerte Exemplar eines Blattinsekts. Von den Forschern um Sonja Wedmann *Eophyllium messelensis* getauft, unterscheidet es sich nur wenig von den heute lebenden Nachfahren, die in Südostasien zu Hause sind. Wie diese gab sich das Tier schon vor 47 Millionen Jahren einfach als Blatt aus und entzog sich so den Blicken hungriger Räuber.

Die Tarnung war bereits ziemlich perfekt: Die Imitation der seitlichen Rippen ist in dem Fossil zwar nicht mehr zu erkennen, aber Hinterleib und Vorderflügel haben außer der typischen Blattform auch einen gezackten Rand. Wie die heutigen Phylliinae konnte das Tier außerdem den Kopf zwischen den Vorderbeinen verbergen. Von diesen äußerlichen Übereinstimmungen schließen die Forscher auch auf ein ähnliches Verhalten. Demnach dürfte das Insekt am Tag lange Zeit regungslos verharrt und nur gelegentlich wie ein Blatt im Wind gezittert haben. *PNAS, 9. 1. 2007, S. 565*

Das 47 Millionen Jahre alte Fossil aus der Grube Messel (links) ähnelt heutigen Blattinsekten (oben).

ARCHÄOLOGIE

Blutiges Ende einer frühen Stadt

■ Vor 5500 Jahren – zeitgleich mit dem sumerischen Uruk – war Hamoukar im Nordosten Syriens eine blühende Stadt. Zwischen Türkei und Mesopotamien gelegen, hatte sie es durch Handel und industrieähnliche Massenproduktion von Gebrauchsgütern zu Wohlstand gebracht. Das entdeckten Archäologen um Clemens Reichel von der Universität Chicago, die dort seit 1999 graben und dabei auf große Mengen an Tonsiegeln, Kupferwerkzeugen und Resten von Obsidianbearbeitung gestoßen sind. Der Obsidian stammte vermutlich aus der Türkei und die fertige Ware ging ins aufstrebende Zweistromland im Süden.

Natürlich weckte der Reichtum Hamoukars Begehrlichkeiten bei den Nachbarn. Deshalb zogen die Bewohner eine drei Meter dicke Mauer um den 16 Hektar großen Stadtkern. Doch vergeblich. Wie jüngste Grabungsergebnisse zeigen, wurde die Stadt überrannt und zerstört. Die Angreifer legten Feuer und schleuderten einen Hagel eiförmiger Tonkugeln gegen die Befestigungen. Über tausend fanden sich unter den Trümmern. Eine hatte den Putz einer Lehmziegelmauer durchschlagen. Die Verteidiger verfertigten offenbar ihrerseits in aller Eile neue Geschosse: In einem Zimmer lagen neben einem in den Boden eingelassenen Wasserkrug, in dem normalerweise schadhafte Tonsiegel wieder aufgeweicht wurden, zwei Dutzend frisch hergestellter Tonkugeln. Doch der Untergang ließ sich nicht mehr abwenden. Am Ende blieben zwölf Tote, deren hastig angelegte Gräber zwischen den Ruinen die Archäologen als weiteres Zeugnis des tragischen Geschehens entdeckten.

Pressemitteilung der Universität Chicago, 16. 1. 2007

UNIVERSITY OF CHICAGO

Ein in den Boden eingelassener Krug mit Wasser diente wohl zur Herstellung von eiförmigen Geschossen aus Lehm.

PLANETOLOGIE

Meteoritenschauer durch Asteroidencrash

KNUT METZLER, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Diese Meteoriten stammen von einer Kollision im Asteroidengürtel, die vor 470 Millionen Jahren stattfand.

Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter enthält eine Ansammlung von Kleinplaneten, die bei einem Zusammenstoß mit der Erde schwerste Zerstörungen anrichten könnten. So hat vor 65 Millionen Jahren der Einschlag eines mehrere Kilometer großen Himmelskörpers die Dinosaurier ausgelöscht. Zum Glück verirrt sich nur äußerst selten einmal ein so dicker Brocken aus unserer kosmischen Nachbarschaft in Richtung Erde. Vor rund 470 Millionen Jahren jedoch prallten zwei wahrscheinlich einige hundert Kilometer große Kleinplaneten im Asteroidengürtel aufeinander – und zersplitterten in unzählige Stücke, die in alle Richtungen auseinanderstoben.

Damals muss ein wahrer Meteoritenschauer auf die Erde geprasselt sein. Das stellten nun Wissenschaftler um Mario Trieloff vom Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg fest. Trümmer der einstigen Kollision sind demnach die so genannten L-Chondrite, die noch heute etwa ein Viertel aller niedergehenden Meteoriten ausmachen.

Indem die Forscher mit einer neuen Methode das Verhältnis der beiden Isotope Argon-40 und Argon-39 bestimmten, konnten sie den Zeitpunkt des Unfalls ermitteln. Er stimmt mit dem Alter von Gesteinsschichten aus dem Ordovizium überein, in dem sich die ältesten L-Chondrite finden.

Meteoritics and Planetary Science, Bd. 42, S. 113

ERNÄHRUNG

Tee besser pur

»Aber bitte mit Sahne« hieß einst ein Hit von Udo Jürgens. »Aber bitte ohne Milch«, sollten Teetrinker künftig sagen, wenn sie ihrem Herzen etwas Gutes tun wollen. Denn neueste Forschungsergebnisse von Kardiologen um Verena Stangl von der Berliner Charité zeigen: Der nicht nur bei Engländern heißgeliebte Fünf-Uhr-Tee wirkt sich ausschließlich dann positiv auf Herz und Gefäße aus, wenn er ohne Milch geschlürft wird.

Im Experiment mussten 16 Frauen zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten ein Croissant verzehren. Als Getränk gab es entweder heißes Wasser oder schwarzen Tee – mal mit und mal ohne Milch. Davor und zwei Stunden danach maßen die Forscher per Ultraschall den Blutfluss der Probandinnen am Arm. Das Resultat: Bei den Frauen, die schwarzen Tee pur getrunken hatten, erweiterten sich die Blutgefäße. Untersuchungen an Ratten bestätigten dieses Ergebnis.

Die gesundheitsfördernde Wirkung von Tee beruht auf den enthaltenen Gerbsäuren, die durch Erweiterung der Blutgefäße der Arteriosklerose vorbeugen. Außerdem stehen sie im Ruf, die Produktion von Stickstoffmonoxid anzuregen, das die Gefäße vor Verhärtung schützt. Milcheiweiß aber verbindet sich mit den Gerbstoffen und verhindert so deren positiven Effekt.

Engländer versetzen ihren Tee stets mit einem Schuss Milch. Ob die Studie diese geheiligte Tradition ins Wanken bringt?

European Heart Journal, Online-Publikation, 9.1. 2007

Die Schwingungen der Nanopauke mit einer Graphitschicht als Trommelfell wurden über eine Goldelektrode (gelb) angeregt und per Laserstrahl (rot) vermessen.

PAUL L. MCEUEN, CORNELL UNIVERSITY UND SCIENCE

TECHNIK

Nanopauke aus Graphit

Die Nanowelt wird immer vielfältiger. Nun gibt es auch das erste Instrument fürs Nanoorchester. Ein Team um Paul McEuen von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) stellte eine winzige Pauke her, indem es mit Graphit vorsichtig über eine Vertiefung in einem Siliziumdioxid-Block strich. Graphit besteht aus übereinandergestapelten Schichten, die nur durch schwache Van-der-Waals-Kräfte verbunden sind und sich deshalb leicht gegeneinander verschieben oder ablösen lassen. Aus diesem Grund wird das Material gewöhnlich für Bleistiftminen und Schmierstoffe verwendet.

Die Forscher konnten nun eine einzelne solche Schicht, in der Sechsecke aus Kohlenstoffatomen zu einem Bienenwabenmuster verbunden sind, als Folie abschälen und über eine wenige Nanometer breite Rille in Siliziumdioxid spannen. So erhielten sie ein Trommelfell, das aus nur einer Atomlage bestand und damit so dünn wie überhaupt möglich war. In Ermangelung geeigneter Schlagstöcke musste es allerdings über Stromstöße aus einer angeschlossenen Elektrode zum Schwingen angeregt werden. Auch war der Ton mit 170 Megahertz für menschliche Ohren, deren Hörvermögen bei 18 Kilohertz endet, viel zu hoch. McEuen und seine Kollegen maßen die Vibrationen deshalb interferometrisch mit einem Laser.

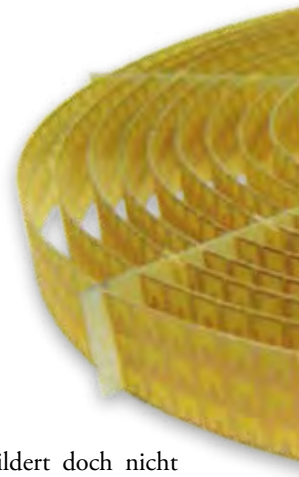
Science, 26.1. 2007, S. 490

Mitarbeit: S. Hügler, A. Römer und I. Wahl

NASA, GSFC / MITI / ERSDAC / JAROS UND DAS US/JAPAN ASTER SCIENCE TEAM

Fraktales Delta

Von ihrer Quelle im Baikalgebirge fließt die Lena 4400 Kilometer quer durch Sibirien, ehe sie sich in die Laptewsee am Rand des Nordpolarmeers ergießt. Schon 150 Kilometer vor ihrer Mündung verzweigt sie sich zu Myriaden von Wasserläufen. Diese neue Detailaufnahme des Radiometers Aster auf dem Terra-Satelliten der Nasa zeigt den Bereich nördlich der ersten großen Gabelung. Das Muster aus sich immer feiner aufspaltenden Seitenästen bietet das Paradebeispiel eines Fraktals, das sich auf allen Größenskalen ähnelt.



PHYSIK Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Moderne Tarnkappe

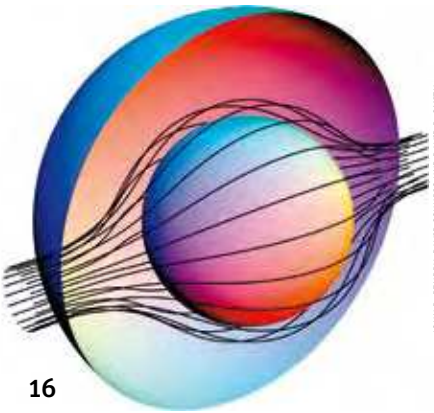
Eine Vorrichtung aus Metallringen lässt Licht um ein Objekt herumfließen und macht dieses somit unsichtbar – vorerst allerdings nur für Mikrowellen.

Von Stefan Maier

Wer wäre in unserem hektischen Alltag nicht gerne einmal für ein paar Stunden unsichtbar? Bisher klappte dieser Trick nur in Sagen und Kinderbüchern – siehe Siegfried und Harry Potter. Nun haben US-Forscher die Tarnkappe jedoch aus der Fantasiewelt in die Realität geholt *(Science, Bd. 314, S. 977)*. David R. Smith und seine Mitarbeiter an der Duke-Universität in Durham (North Carolina) bauten ihren Zaubermantel nach einem Rezept, das sie zusammen mit dem theoretischen Physiker John Pendry vom Imperial College in London entwickelt und fünf Monate zuvor veröffentlicht hatten *(Science, Bd. 312, S. 1780)*. Was Möchtegern-Siegfrieds besonders erfreuen dürfte: Die Zutaten zur Herstellung der Tarnkappe sind nichts weiter als ringartige Strukturen aus Metall.

Doch bevor Sie versuchen, das Wunderding selbst zu bauen, sollten Sie die Risiken und Nebenwirkungen kennen. So würden nicht nur Sie für die Welt unsichtbar, sondern auch die Welt für Sie – Sie wären also blind. Außerdem verschwänden Sie im jetzigen Modell lediglich für polarisierte Mikrowellen mit einer Wellenlänge von 3,5 Zentimetern von der Bildfläche – und auch das nur in einer Ebene senkrecht zur Polarisationsrichtung und nicht einmal vollständig: Ein schwacher Schatten bliebe.

Wenn ein Gegenstand unsichtbar werden soll, muss man die Lichtstrahlen um ihn herumlenken und dafür sorgen, dass sie dahinter ihren ursprünglichen Weg fortsetzen, als habe es kein Hindernis gegeben.



JOHN B. PENDRY, DAVID SCHURIG UND DAVID R. SMITH

Aber wir wollen nicht kleinlich sein und zu viel auf einmal verlangen. Wissenschaftler und Techniker werden bestimmt alles daran setzen, die Vorrichtung Schritt für Schritt zu verbessern. Haben wir also noch ein wenig Geduld!

Wie aber macht man einen Körper unsichtbar? Die Antwort ist im Grunde einfach: Man sorgt dafür, dass alle Lichtstrahlen, die auf ihn treffen würden, um ihn herumgelenkt werden und sich hinter ihm wieder so vereinigen, als wäre das Objekt gar nicht vorhanden – ähnlich den Strömungslinien von Wasser, das einen Gegenstand umfließt.

Aber wie lässt sich ein solcher Strahlengang realisieren? Die Antwort sitzt Ihnen womöglich auf der Nase. Wie jeder weiß, können Glaslinsen Licht ablenken und auf einen Punkt fokussieren. Die Stärke dieses Effekts hängt vom Brechungsindex des betreffenden Materials ab. Im Prinzip sollte es also gelingen, durch eine geschickte Anordnung von Linsen die Lichtstrahlen in der geschilderten Weise um das zu versteckende Objekt herumzulenken.

Statt mit einem konisch geschliffenen Glaskörper kann man Licht aber auch mit einer flachen Scheibe fokussieren, wenn deren Brechungsindex durch chemische Modifikation lokal in geeigneter Weise abgewandelt wird. Somit lässt sich die vorgeschlagene Anordnung von Linsen durch einen zusammenhängenden Glaszylinder ersetzen, der den zu verbergenden Gegenstand umhüllt. Wie dessen Brechungsindex variieren muss, hatte Pendry in seiner theoretischen Arbeit für ein kugelförmiges Objekt berechnet.

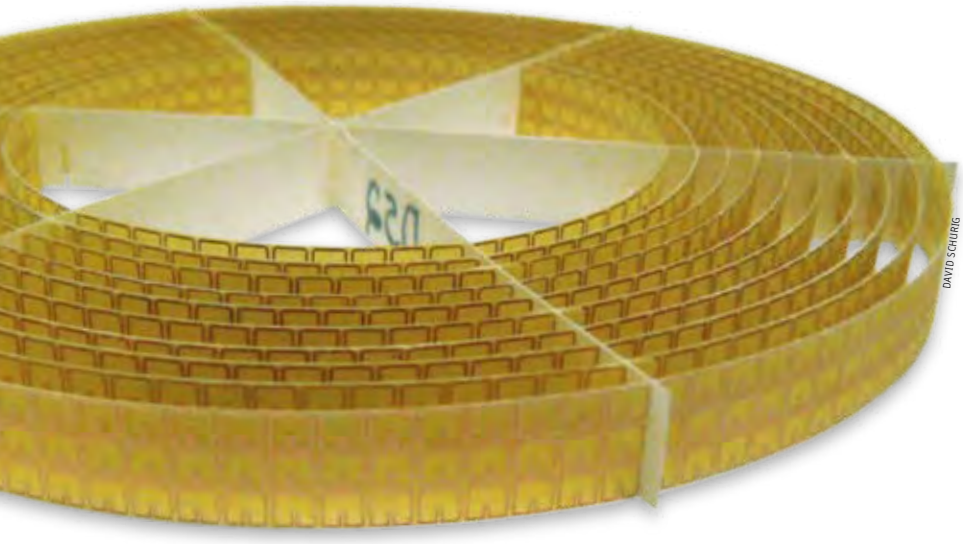
Das Ergebnis birgt allerdings etliche Tücken und zeigt, dass der Trick so einfach wie gerade geschildert doch nicht funktioniert. So muss sich das Licht in der durchsichtigen Hülle, welche die zu verbergende Kugel umhüllt, überall schneller ausbreiten als im umgebenden leeren Raum; denn es hat einen längeren Weg zurückzulegen.

Doch keine Panik – Einsteins Relativitätstheorie steht dem nicht entgegen; denn nur die so genannte Phasengeschwindigkeit der Lichtwellen muss die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum überschreiten, damit die Tarnkappe funktioniert. Die Gruppengeschwindigkeit, mit der Lichtimpulse zum Beispiel Informationen übermitteln können, bleibt dagegen geringer. Grundsätzlich ließe sich die Tarnkappe also im Einklang mit den Gesetzen der Physik herstellen.

Negativer Brechungsindex

Dennoch ist die praktische Realisierung extrem schwierig. Der Brechungsindex muss nämlich nicht nur über einen weiten Bereich variieren, sondern auch kleiner als eins oder gar negativ sein – was bis vor Kurzem unvorstellbar schien. Erst neuerdings lassen sich dank der gemeinsamen Forschung einer Vielzahl von Wissenschaftlern künstliche Stoffe mit fast beliebigem und somit auch negativem Brechungsindex herstellen – bisher allerdings nur im Spektralbereich zwischen Mikrowellen und Infrarotlicht. Man bezeichnet sie als Metamaterialien, weil sie nicht wie normale Werkstoffe in sich chemisch homogen sind, sondern aus verschiedenartigen makroskopischen, wenngleich immer noch winzigen Strukturelementen bestehen, die in regelmäßigen Mustern angeordnet werden.

In unserem Fall handelt es sich, wie Pendry schon gegen Ende der 1990er Jahre herausfand, um periodische Abfolgen von Stäbchen und Ringen aus Metall. Wenn ihre Abmessungen und ihr gegenseitiger Abstand viel kleiner als die Wellenlänge der verwendeten elektro-



Mit dieser Tarnkappe ließ sich ein flacher Kupferzylinder für parallel zu seiner Achse polarisierte Mikrowellen weit gehend unsichtbar machen. Dazu wurden Reihen aus quadratischen, metallenen »Spaltringen« in Plastikfolien konzentrisch um den Zylinder angeordnet.

magnetischen Strahlung sind, erscheint der Körper für diese Strahlung als ein homogener Stoff. Der Brechungsindex hängt dann von den Dimensionen der metallischen Bauteile ab und lässt sich durch Resonanzeffekte über einen weiten Bereich variieren.

Forscher in aller Welt haben innerhalb der letzten Jahre eine Vielzahl derartiger Metamaterialien geschaffen und gezeigt, dass deren Brechungsindex in der Tat praktisch beliebig einstellbar ist. Auch negative Werte kann er annehmen, sodass Licht in die »falsche« Richtung gebrochen wird (Spektrum der Wissenschaft 10/2006, S. 74).

Obwohl Metamaterialien also alle Voraussetzungen für den Bau von Pendrys Tarnkappe erfüllen, warf die praktische Realisierung noch mehr als genug Probleme auf. Deshalb mussten die Forscher Kompromisse eingehen. So versteckten sie statt einer Kugel einen flachen Zylinder. Außerdem ließen sie die Stäbchen weg und benutzten nur Ringe, die sie parallel zueinander in einer Ebene um den Zylindermantel anordneten.

Dadurch kam es zu den genannten Einschränkungen: Ausschließlich Mikrowellen, die senkrecht zur Ringebene polarisiert waren, wurden in der gewünschten Weise um das zu versteckende Objekt gelenkt. Da das Metamaterial wegen der fehlenden Stäbchen außerdem einen kleinen Teil der Strahlung reflektierte, warf der Zylinder im Zaubermantel einen schwachen Schatten.

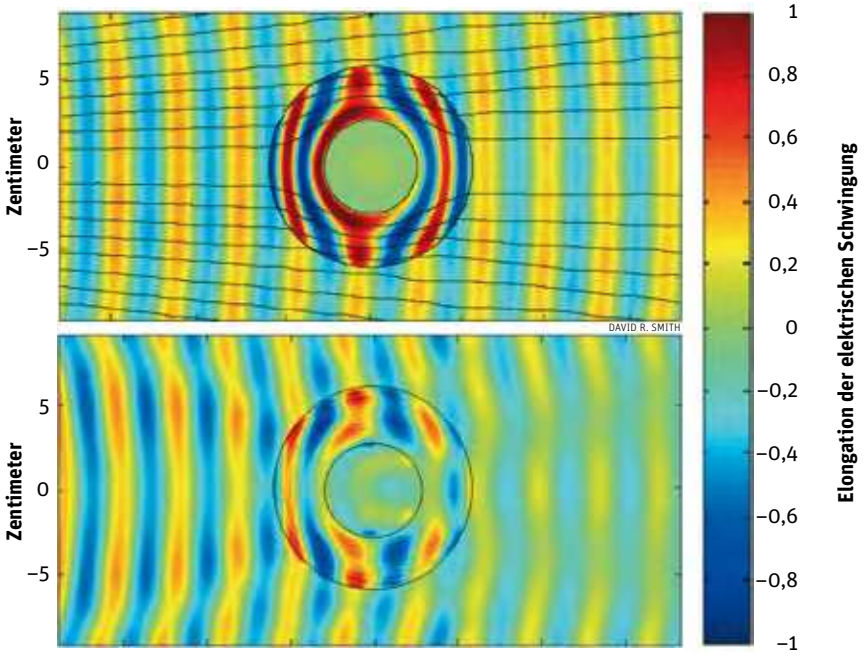
Doch trotz dieser Einschränkungen bedeutet die erste real existierende Tarnkappe eine große technische Errungenschaft. Auch Anwendungsmöglichkeiten sind bereits denkbar. So könnte die Apparatur in verbesserter, weiterentwickelter Form zur Abschirmung elektronischer Bauteile vor langwelliger elektromagnetischer Strahlung dienen.

Außerdem ist die Ausdehnung des Spektralbereichs bis zum sichtbaren Licht keineswegs ausgeschlossen. Allerdings müssten die Ringe und Stäbchen dann Abmessungen von wenigen Nanometern haben, damit sie sehr viel kleiner sind als die Wellenlänge der Strahlung. Das stellt extreme Anforderungen an ihre Fabrikation. Trotzdem sind Forscher seit zwei Jahren dabei, auch Metamaterialien für sichtbares Licht zu konstruieren.

Ein Zaubermantel für den gesamten optischen Spektralbereich ist dennoch nicht zu erwarten. Die Tarnung funktioniert nämlich nur jeweils für einen sehr kleinen Ausschnitt aus dem Spektrum, da der Brechungsindex eines Metamaterials stark von der Wellenlänge abhängt. Somit müsste für jede Farbe eine eigene Tarnkappe angefertigt werden. Die verschiedenen Exemplare übereinander anzuziehen, um komplett unsichtbar zu sein, wäre auch nicht ohne Weiteres möglich, weil sich ihre Effekte überlagern und stören würden.

Außerdem ließe sich mit extrem kurzen Lichtblitzen, die aus nur wenigen Wellenzügen bestehen, die Tarnung aufheben. Diese schmalen Wellenpakete müssten sich, damit das Objekt unsichtbar bleibt, als ganze schneller bewegen als Licht im Vakuum. Das aber würde bedeuten, dass man mit ihnen Informationen – etwa in Form von Morse-Code – im Überlichttempo senden könnte. Und das ist dann doch mehr, als Einstein erlaubt.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).



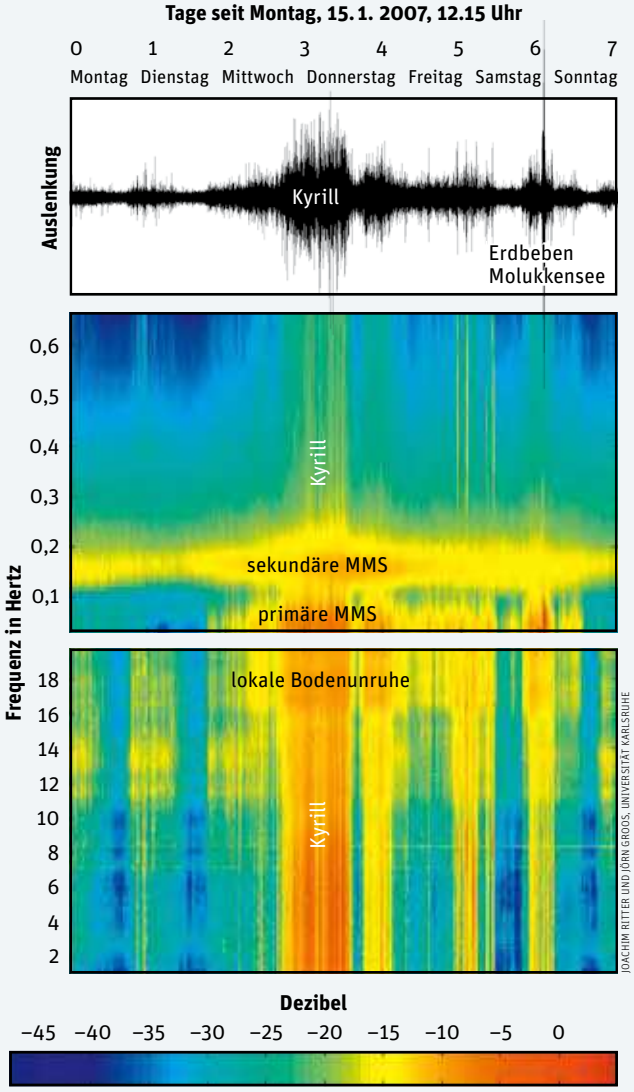
Eine ebene Lichtwelle, die auf einen Kupferzylinder mit Tarnkappe trifft, bewegt sich dahinter unverzerrt weiter. Anders als bei der Simulation einer idealen Tarnkappe (oben) wird die Welle im realen Fall (unten) allerdings etwas geschwächt, sodass das versteckte Objekt einen leichen Schatten wirft. Die Farben geben den momentanen Wert des elektrischen Feldvektors an.

Kyrills seismischer Fingerabdruck

Der Orkan Kyrill ließ auch den Boden erzittern.

Vom 18. bis 19. Januar 2007 tobte der Orkan Kyrill über weiten Teilen Europas. Wegen seiner ungewöhnlichen Stärke ließ er sich nicht nur mit den üblichen meteorologischen und satellitengestützten Instrumenten beobachten, sondern auch mit Geräten, die normalerweise Erdbeben registrieren.

Wie ist das zu erklären? Auf dem Meer und im Küstenbereich erzeugen schwere Stürme hohe Wellen. Die resultierenden Höhenänderungen der Wassersäule wirken am Meeresboden als Druckschwankungen, die seismische Schwingungen im tieffrequenten Bereich erregen. Man unterscheidet eine primäre Meeresmikroseismik, die bei etwa 0,05 bis 0,08 Hertz liegt, und eine stärkere sekundäre bei 0,1 bis 0,2 Hertz. An Land prallen die Windböen gegen Berge und rütteln an Bäumen und Gebäuden. Auch dabei verursachen sie seismische Wellen, deren Frequenzen allerdings bis über 50 Hertz reichen.



Die von Orkan Kyrill verursachten Ausschläge eines Seismometers bei Karlsruhe waren fast so stark wie die eines Erdbebens der Magnitude 7,3 unter der Molukkensee (oben). In Spektrogrammen, in denen die Intensität der seismischen Schwingungen nach der Frequenz aufgeschlüsselt ist, lässt sich die niederfrequente Meeresmikroseismik (MMS) von den höherfrequenten lokalen Bodenvibrationen unterscheiden (unten).

Die von Orkan Kyrill ausgelösten Bodenbewegungen konnten wir mit einer Station des Geophysikalischen Instituts der Universität Karlsruhe am Rand von Karlsruhe-Durlach außergewöhnlich gut beobachten. Was das Seismometer aufzeichnete, waren Erschütterungen über ein breites Frequenzband von 0,03 bis 20 Hertz. In dem so erhaltenen Seismogramm für die Zeit von Montag, dem 15., bis Montag, dem 22. Januar 2007, lässt sich ab Mittwochabend ein Anschwellen der Bodenunruhe auf etwa das Dreifache des typischen Hintergrundwerts erkennen. Der Effekt kulminiert am Donnerstagabend und ebbt zum Wochenende hin ab. Tatsächlich sind die Ausschläge im Maximum fast so stark wie bei einem heftigen Erdbeben der Magnitude 7,3, das sich am Sonntag, dem 21. Januar, unter der Molukkensee im östlichen Indonesien ereignete.

Um die Daten besser analysieren zu können, unterzogen wir sie einer Fouriertransformation und stellten sie in zwei Spektrogrammen dar, welche die farbcodierte Intensität der Wellen in Abhängigkeit von der Frequenz zeigen. Dabei normierten wir die Bodenbewegung auf ihr Maximum und rechneten sie in Dezibel um. Der resultierende Wertebereich erstreckt sich also von null für die stärkste Erschütterung (rot) zu negativen Zahlen hin (siehe Maßstab).

Wie dem tieffrequenten Spektrogramm zu entnehmen ist, stieg als Erstes die Meeresmikroseismik an. Das Orkantief, das sich aus Westen über den Atlantik nach Europa bewegte, verursachte nämlich ab Mittwoch früh bereits einen erhöhten Wellengang. Dadurch setzte die vorher unmessbar schwache primäre Meeresmikroseismik unterhalb 0,1 Hertz ein und die Amplitude der sekundären erhöhte sich. Beide Effekte wurden noch vom lokalen Wind überlagert und hielten rund drei Tage an – bis Samstagmorgen.

Die lokale Bodenunruhe, deren Frequenzspektrum von einigen wenigen bis mindestens 20 Hertz reicht, verstärkte sich dagegen erst am Vormittag des 18. Januar, als der Orkan in Südwestdeutschland ankam. Und schon nach einem Tag waren die Er-schütterungen wieder abgeklungen. Im hochfrequenten Spektrogramm erscheinen sie als rotes Band inmitten eines Streifenmusters, das die von Menschen verursachte Seismizität widerspiegelt, die im Tag-Nacht-Rhythmus schwankt. Horizontale Linien stammen von elektrisch betriebenen Maschinen – von Heizungspumpen bis zu großen Stromgeneratoren – im Großraum Karlsruhe mit diskreten Schwingungsfrequenzen.

Dass ein Sturm auch den Boden erzittern lässt, ist zwar keine neue Erkenntnis, ließ sich aber bisher selten so deutlich demonstrieren. Die Erschütterungen zu registrieren hat auch praktischen Wert. So können historische Messungen der Meeresmikroseismik beispielsweise dazu dienen, Auswirkungen des Klimawandels auf die Ozeane in den letzten hundert Jahren zu rekonstruieren.

Joachim R. R. Ritter und **Jörn Groos**
Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe

WAHRNEHMUNG

Wie wir Gesichter erkennen

In welcher Form werden Gesichter in unserem Gehirn gespeichert? Offenbar merken wir uns nur die Abweichungen von einem Durchschnittsgesicht.

Von Martin A. Giese
und David A. Leopold

Wenn wir Bekannte treffen, erkennen wir sie in erster Linie an ihrem Gesicht. Zudem können wir aus ihrer Miene schnell auf ihre Stimmung schließen. Allgemein hilft das visuelle Erkennen von Gesichtsbewegungen auch beim Verstehen von Sprache. All das zeigt die große Bedeutung, die Gesichter für uns haben. Deshalb ist unser Sehsystem besonders auf sie geeicht. Mühelos können wir auf Fotos Hunderte von Gesichtern unterscheiden, selbst wenn sie nur kurz gezeigt werden. Manche Nervenzellen feuern dabei schon 0,1 Sekunden nach der Präsentation.

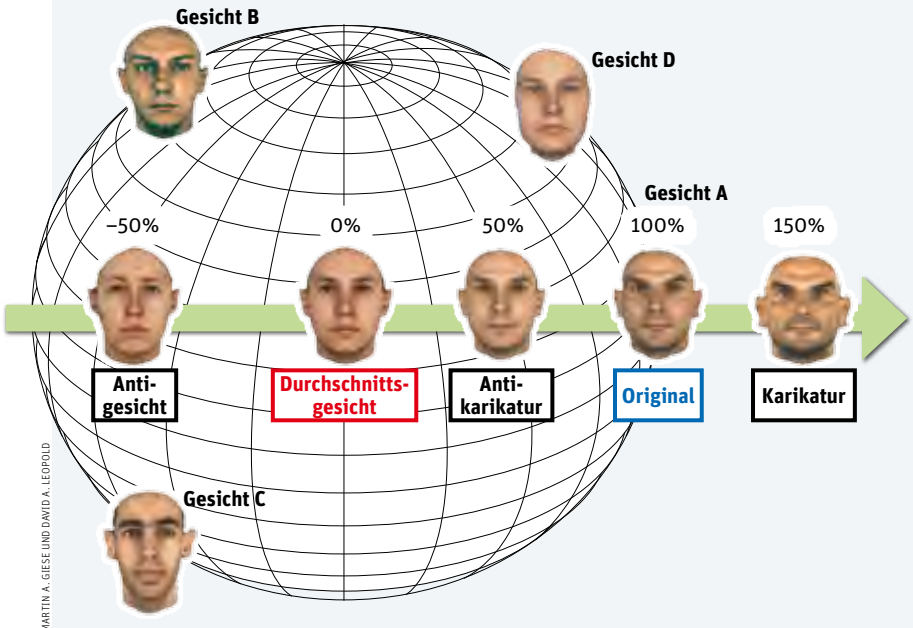
Psychologen untersuchen die Gesichtswahrnehmung seit Langem. Dabei haben sie einige wichtige Eigenschaften entdeckt. Zum Beispiel erkennen wir Gesichter sehr viel schlechter, wenn sie auf dem Kopf stehen. Außerdem gibt es eine Art Vertrautheitseffekt: Gesichter von Menschen aus unserem eigenen Kulturkreis, die wir häufig sehen, können wir besser unterscheiden als solche von Mitgliedern anderer Rassen, mit denen wir weniger Kontakt haben.

Welche Hirnregionen sind an der Gesichtserkennung beteiligt? Erste Aufschlüsse gaben wie bei anderen Sinnesleistungen Patienten mit lokalen Hirnverletzungen, bei denen diese Fähigkeit gestört war. Wesentlich genauer ließen sich die beteiligten Hirnstrukturen jedoch später mit bildgebenden Verfahren wie der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) ermitteln. Demnach spielen beim Menschen insbesondere Hirnregionen im Schläfenlappen – tief an seiner Basis im fusiformen Gyrus *(fusiform face area*, FFA) und etwa höher in seiner oberen Furche (*Sulcus temporalis superior*, STS) – eine wichtige Rolle. Dabei scheint die erstgenannte Region vor allem am Wiedererkennen von Gesichtern beteiligt zu sein, während die zweite eher veränderliche Aspekte wie das Mienenspiel verarbeitet.

Wie beschreibt man nun Gesichter, um die neuronalen Mechanismen ihrer Wahrnehmung erforschen zu können? Am besten betrachtet man sie als Punkte in einem mehrdimensionalen Raum (Bild unten). Ähnliche Gesichter entsprechen dabei benachbarten Punkten. Jede der unzähligen Achsen dieses Raums verkörpert eine andere Eigenschaft. Wenn eine große Zahl von Gesichtern gegeben ist, kann man ihren »Schwerpunkt« berechnen und so das Durchschnittsgesicht ermitteln. Dieses wird, wie Untersuchungen ergaben, meist als besonders ansprechend empfunden.

Karikatur wird leichter erkannt

Statt durch seine Koordinaten im Gesichtsraum kann man ein gegebenes Gesicht nun auch mit dem Vektor beschreiben, der vom Durchschnittsgesicht zu ihm führt. Er gibt an, wie stark es in welcher Richtung von diesem abweicht. Verlängert man den Vektor, entsteht eine Karikatur; denn die typischen Merkmale des betreffenden Gesichts erscheinen nun in übertriebener Form. Solche Karikaturen werden normalerweise sicherer und schneller erkannt als die Originalgesichter. Wird die Verbindungslinie zwischen Durchschnitts- und Originalgesicht verkürzt, ergibt sich dagegen eine



Gesichter lassen sich als Punkte in einem mehrdimensionalen Gesichtsraum auffassen, dessen Achsen einzelne Merkmale repräsentieren. Ihr Schwerpunkt entspricht dann dem Durchschnittsgesicht. Indem man den Vektor von diesem zu einem Originalgesicht verlängert, verkürzt oder in die Gegenrichtung spiegelt, erhält man eine Karikatur, eine Antikarikatur oder ein Antigesicht. Die vier abgebildeten Beispielgesichter in einem Gesichtsraum, der zwangsläufig nur dreidimensional dargestellt ist, wurden mit einem Bildsyntheseverfahren erzeugt, das Volker Blanz and Thomas Vetter vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen entwickelt haben.

Antikarikatur. Die Länge des Vektors entlang der Achse zwischen Durchschnitts- und Originalgesicht wird auch Karikaturlevel genannt.

Man kann den genannten Vektor aber auch über das Durchschnittsgesicht hinaus in der entgegengesetzten Richtung verlängern. Dann kommt man in den Bereich der Antigesichter. Auch hier gibt es einen interessanten Effekt: Zeigt man für einige Sekunden das Antigesicht, bei dem der ursprüngliche Vektor gerade gespiegelt ist, und präsentiert dann kurz das Durchschnittsgesicht, entsteht vorübergehend ein Wahrnehmungseindruck, der dem Originalgesicht ähnelt. Dieses Phänomen bezeichnen Psychologen als Gesichtsnacheffekt.

Aber wie sind Gesichter im Gehirn repräsentiert? In der Psychologie gibt es vor allem zwei konkurrierende Theorien darüber. Die eine postuliert eine »beispielbasierte Enkodierung«. Demnach soll es einzelne Neuronen oder Neuronengruppen geben, die jeweils besonders stark auf ein spezielles eingeprägtes Gesichter reagieren. Je mehr der aktuelle Stimulus diesem gleicht, desto stärker feuern sie. Der Gesichtsraum wäre dann durch eine Vielzahl solcher Neuronen abgedeckt, die jeweils für einzelne Regionen zuständig sind.

Dem steht die Theorie der »normbasierten Enkodierung« gegenüber. Ihr zufolge merkt sich das Gehirn die Abweichung des jeweiligen Gesichts vom Durchschnitt – der »Norm« –, indem es Länge und Richtung des Vektors zwischen beiden ermittelt und abspeichert. Die Ergebnisse vieler psychophysischer Experimente sind mit beiden Theorien vereinbar. Deshalb war es bisher schwierig, eine Entscheidung zwischen ihnen zu fällen.

Versuche mit Affen

Um weitere Aufschlüsse zu gewinnen, haben wir elektrophysiologische Experimente mit zwei Makaken durchgeführt. Dabei maßen wir die Aktivität von insgesamt 209 gesichtsselektiven Nervenzellen im unteren Schläfenlappen in Abhängigkeit von dargebotenen künstlichen fotorealistischen Gesichtsbildern *(Nature, Bd. 442, S. 572)*. Diese waren mit einer Methode des Max-Planck-Instituts für biologische Kybernetik (Tübingen) erzeugt worden. Grundlage bildeten dreidimensionale Laser-Scans von etwa 200 realen Gesichtern. Durch Interpolation zwischen ihnen wurde ein Gesichterraum modelliert und das zugehörige Durchschnittsgesicht berechnet.

Aus diesem Raum wählten wir vier Gesichter aus, die einander möglichst unähnlich waren. Von ihnen erzeugten wir dann Karikaturen, Antikarikaturen und Antigesichter. Diese präsentierten wir den beiden Affen in zufälliger Reihenfolge auf einem Computerbildschirm. Das eine Tier war darauf trainiert worden, per Hebelbewegung anzugeben, welches der vier Originale es in dem dargebotenen Gesicht erkannt hat. Das andere sollte die ganze Zeit über nur einen Punkt auf dem Bildschirm fixieren. Bei beiden Makaken maßen wir während des Versuchs die Aktivitäten von Neuronen, die auf Gesichter reagieren.

Zum einen stellten wir dabei fest, dass das Aktivierungsmuster bei den zwei Affen übereinstimmte. Für das Verhalten der Neuronen spielt es demnach keine Rolle, ob das betreffende Tier sich bewusst auf das Erkennen von Gesichtern konzentriert. Offenbar handelt es sich um einen automatischen Prozess, der auch dann im Hintergrund abläuft, wenn die Aufmerksamkeit nicht darauf gerichtet ist. ▷

ANZEIGE

Konzentrierter. Ausgeglichener. Belastbarer.

Wunderwerk Gehirn: Wie ich meine Konzentration verbessere.

Unser Gehirn ist ein Wunderwerk der Natur: es steuert unsere Gefühle und bestimmt unsere Konzentration. Ein Netzwerk aus 100 Milliarden Gehirnzellen – und jede Zelle eine Energiequelle, die wir besser nutzen können. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration.

Unsere Konzentration ist abhängig von der Energieleistung der Mitochondrien. Diese „Kraftwerke" in den Gehirnzellen versorgen uns jeden Tag mit neuer Energie. Auf diese natürliche Energie-Produktion der Gehirnzellen kann man heute gezielt einwirken und **die Gehirnleistung „ankurbeln".** Genau dafür wurde **Tebonin®** mit dem exklusiven Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761® entwickelt. **Tebonin®** schützt die Mitochondrien vor Leistungsabfall, ihre Energieversorgung bleibt aktiv. Selbst angegriffene Zellen können wieder regeneriert werden. So wird auf natürliche Weise Ihre **geistige Leistungsfähigkeit gesteigert.**

Nach wenigen Wochen werden Sie feststellen: Sie sind **konzentrierter und die Gedächtnisleistung nimmt zu.** Besser belastbar meistern Sie die Anforderungen des Alltags leichter und sind ausgeglichener. Kurz: Sie haben **spürbar mehr Gehirnleistung** – auch andere werden es merken. Fragen Sie noch heute Ihren Apotheker nach **Tebonin®**. Er wird Sie gerne beraten.

www.tebonin.de

Tebonin® intens 120 mg Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei durch altersbedingte Arterienverengung hirnorganisch bedingten geistigen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit und Konzentration, Kopfschmerzen, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Hinweise: Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.** Stand: 01/07 T/01/07/3/1

▷ Das zweite Ergebnis betraf die Reaktion der einzelnen Nervenzellen. Jede zeigte, wie erwartet, ein anderes Aktivierungsmuster. Dennoch gab es grundlegende Gemeinsamkeiten. So sprach eine bestimmte Zelle meist auf ein oder zwei Gesichter besonders stark an; von den anderen wurde sie schlechter oder gar nicht aktiviert (Bild rechts). Das ist auf den ersten Blick noch mit einer beispielbasierten Enkodierung vereinbar.

Die genauere Analyse spricht jedoch gegen dieses Modell. Wie wir nämlich feststellten, nahm die Reaktion eines Neurons in der Regel mit dem Karikaturlevel zu. Am geringsten fiel sie beim Durchschnittsgesicht aus. Demnach repräsentiert die neuronale Aktivität bei gegebener Richtung im Gesichtsraum die Distanz vom Durchschnittsgesicht – in Einklang mit dem Modell der normbasierten Enkodierung. Auch für die gesamte Neuronenpopulation beobachteten wir eine selektive Reaktion in ausgewählten Richtungen im Gesichtsraum und im Mittel einen monotonen Anstieg mit dem Karikaturlevel. Nur bei einer kleinen Gruppe von Neuronen verhält es sich umgekehrt: Sie sprechen am stärksten auf das Durchschnittgesicht an und werden umso weniger erregt, je größer die Abweichung davon ist.

Durchschnitt als Maßstab

Dieses Verhalten gesichtsselektiver Nervenzellen kann auch die eingangs erwähnten Beobachtungen erklären. Beim Karikatureffekt ist das evident; denn wenn Neuronen auf Karikaturen stärker ansprechen als auf die Originalgesichter, werden diese natürlich besser erkannt. Unsere Ergebnisse bieten aber auch einen Ansatz, um zu verstehen, wieso wir Angehörige fremder Rassen schlechter unterscheiden können. Da wir mit ihnen kaum in Kontakt kommen, haben wir vermutlich kein entsprechendes Durchschnittsgesicht gelernt. Vielmehr benutzen wir dasjenige der eigenen Rasse als Standard. Es liegt aber im Gesichtsraum relativ weit von diesen fremdartigen Gesichtern entfernt. Die Differenzvektoren zum Durchschnittsgesicht weisen daher alle in ähnliche Richtungen und sind ziemlich groß, was die Unterscheidung erschwert.

Auch Untersuchungen anderer Gruppen am Menschen unterstreichen die spezielle Rolle des Durchschnittsgesichts. So fand ein Team um Gunter Loffler von der Glasgow Caledonian University in einem

Springers Einwürfe

Peinliche Befragung

Dient Folter der Wahrheitsfindung?

Folter ist verboten. Artikel 5 der Menschenrechtserklärung der Vereinten Nationen sowie Artikel 3 der Europäischen Menschenrechtskonvention ächten sie ausdrücklich. Dennoch werden seit einigen Jahren – nicht zuletzt seit dem Anschlag auf das World Trade Center im September 2001 – Ausnahmen diskutiert, insbesondere unter dem Stichwort Rettungsfolter: Was tun, wenn ein verhafteter Terrorist eine tickende Bombe an unbekanntem Ort versteckt hat? Darf man ihn gewaltsam zur Preisgabe des Verstecks zwingen, um den Tod unschuldiger Bombenopfer zu verhindern? Oder darf man – wie im Herbst 2002 in Frankfurt geschehen – einem mutmaßlichen Entführer »massive Schmerzzufügung« androhen, um dadurch vielleicht das Leben des Entführten zu retten?

Da im »Krieg gegen den Terrorismus« offenbar von Anfang an folterähnliche Verhörmethoden praktiziert wurden, stellt sich – abgesehen von moralischen und juristischen Einwänden – die Frage nach deren Wirksamkeit. Eine Antwort gibt jetzt die Studie »Educing Information« (etwa: Wie man Informationen entlockt) des Intelligence Science Board, eines Wissenschaftlergremiums im Auftrag der US-Geheimdienste (im Internet unter www.fas.org/irp/dni/educing.pdf).

In dem 374 Seiten langen Bericht wird einleitend klargestellt, man wolle juristische oder ethische Probleme bewusst ausklammern; die Frage laute: »Was wirkt?« Bei jedem Verhör gehe es doch darum, die Wahrheit herauszufinden, aber erstaunlicherweise seien Verhörmethoden praktisch nie wissenschaftlich darauf untersucht worden, wie wirksam sie dieses Ziel erreichten.

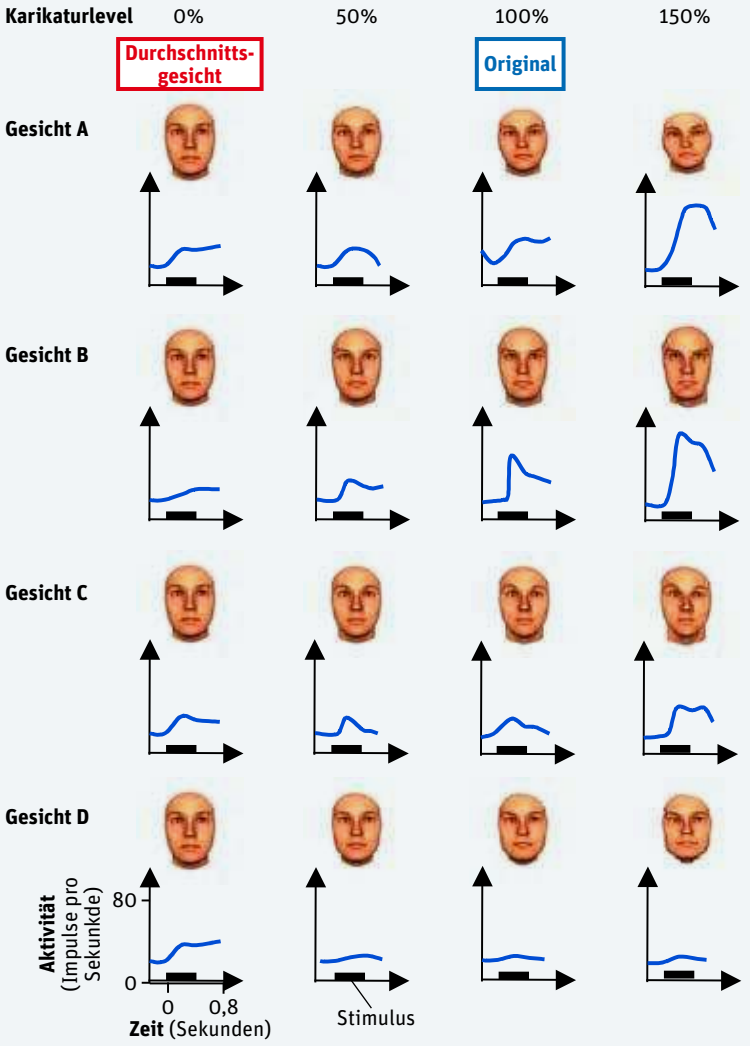
Das Gesamturteil fällt vernichtend aus. Im Grunde spielen die Beteiligten eines Verhörs nur nach, was sie aus Fernsehserien kennen. Das Erfahrungswissen der Vernehmenden – »ich sehe, wann der Verdächtige lügt« – ist ungesichert. Einschüchterung, von Quälerei ganz zu schweigen, wirkt meist kontraproduktiv. Sie verstärkt zunächst nur den Widerstand des Opfers oder bringt es schließlich dazu, aus Angst alles auszusagen, was die Befragung verkürzt – ob wahr oder falsch.

Wie es sich für eine wissenschaftliche Studie gehört, kommen die Autoren zu dem Schluss, das Gebiet verlange nach weiterer gründlicher Untersuchung. Das hat unterdessen in den USA zu einem pikanten Streit unter Psychologen und Psychiatern geführt, ob es überhaupt ethisch vertretbar sei, über Verhörmethoden zu forschen *(Nature, Bd. 445, S. 349)*.

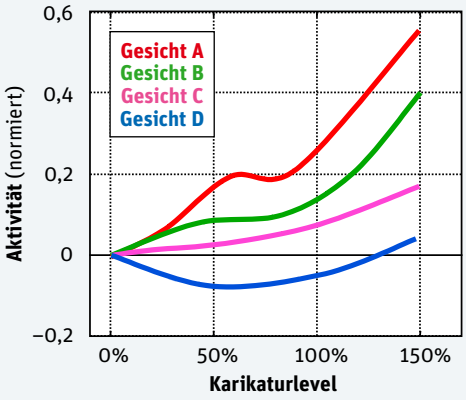
Ich meine: Ja. Eine rationale Behandlung des Themas führt offenbar zu humaneren Praktiken. Folter taugt zur Wahrheitsfindung heute nicht besser als einst im Mittelalter die »peinliche Befragung«. Wie schon der große Skeptiker Bertrand Russell meinte: »Kein Mensch behandelt ein Auto so töricht wie seinen Mitmenschen. Wenn das Auto nicht fährt, schreibt er dieses ärgerliche Verhalten nicht der Sünde zu; er sagt nicht: ›Du böses Auto, ich gebe dir erst Benzin, wenn du wieder fährst.‹ Er versucht den Fehler zu finden und zu reparieren.«

Vernünftig sind offenbar positiv verstärkende Gesprächsmethoden: Statt Schweigen zu bestrafen, wird die wahrhafte Aussage belohnt, etwa durch Hafterleichterung oder -verkürzung. In diesem Sinn untersucht die Studie ausgiebig spieltheoretische und wirtschaftstheoretische Modelle, die das Aushandeln von beiderseitigen Vorteilen beschreiben. Vielleicht würde das ideale Verhör einer psychoanalytischen Redekur ähneln, die verdrängte Bewusstseinsinhalte – in diesem Fall bewusst unterdrücktes Wissen – zu Tage fördert.

Michael Springer



MARTIN A. GIESE UND DAVID A. LEOPOLD



Eine typische an der Gesichtserkennung beteiligte Nervenzelle spricht unterschiedlich stark auf verschiedene Gesichter an (links). Die Aktivität nimmt mit dem Karikaturlevel zu, sodass Karikaturen eine stärkere Reaktion auslösen als das Original. Dasselbe gilt, wenn man die durchschnittliche Aktivierung aller gesichtsselektiven Neuronen betrachtet (unten). Allerdings variiert das Ausmaß des Effekts für Gesichter, welche die jeweilige Zelle maximal (1), am zweitstärksten (2), am drittstärksten (3) und minimal (4) erregen.

fMRT-Experiment ebenfalls einen Anstieg der Aktivität in der Region FFA mit dem Karikaturlevel *(Nature Neuroscience, Bd. 8, S. 1386)*. Zudem ergaben jüngste psychophysische Experimente von Gillian Rhodes und Linda Jeffery von der University of Western Australia in Perth, dass starke Gesichtsnacheffekte tatsächlich nur bei echten Antigesichtern auftreten – also bei solchen, die auf der Verlängerung einer Linie vom Originalgesicht zum Durchschnittsgesicht liegen *(Vision Research, Bd. 46, S. 2977)*.

Die Hypothese der normbasierten Enkodierung von Gesichtern wird also durch eine Reihe neuer Resultate gestützt. Wirklich bewiesen ist sie damit aber noch nicht. Um zu einer endgültigen Entscheidung zu gelangen, müssten Theoretiker versuchen, die neuen Ergebnisse mit Modellen zu reproduzieren, die entweder auf einer beispiel- oder einer normbasierten Enkodierung von Gesichtern beruhen. Das Ergebnis wäre über die Gesichtserkennung hinaus von Interesse. Wie sich herausgestellt hat, verhalten sich Neurone, die auf andere geometrische Formen reagieren, nämlich ganz ähnlich. Das deutet darauf hin, dass die Prinzipien der neuronalen Repräsentation von Gesichtern von allgemeinerer Bedeutung sind.

Martin A. Giese ist promovierter Neuroinformatiker. Er leitet am Hertie-Institut für klinische Hirnforschung in Tübingen die Arbeitsgruppe für Handlungsrepräsentation und Lernen. **David A. Leopold** ist Leiter der Unit of Cognitive Neurophysiology and Imaging am National Institute of Mental Health in Bethesda (Maryland).

ANZEIGE

NEUGIER UND VERANTWORTUNG –
FORSCHUNG FÜR DIE GESELLSCHAFT VON MORGEN

MIT PROF. DR.
LORRAINE DASTON
MPI für Wissenschaftsgeschichte, Berlin
PROF. DR. GISELA LÜCK
Didaktik der Chemie
Universität Bielefeld

PROF. DR. DR.
FRANZ JOSEF RADERMACHER
Institut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung, Ulm
UND ANDERE ...

Anmeldung:
www.gruene-bundestag.de → Service → Termine
forschungskongress@gruene-bundestag.de
T: 030/227 51066, F: 030/227 56058

23./24. MÄRZ 2007
KONGRESS IM LUDWIG ERHARD HAUS, BERLIN

BÜNDNIS 90 DIE GRÜNEN
Bundestagsfraktion

SPEKTRUM-INTERVIEW ZUM KLIMAREPORT

»Bis zur eisfreien Arktis ist es nur eine Frage der Zeit«

Der Anfang Februar herausgebrachte vierte Klimareport des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) liefert die aktuellen Prognosen zum globalen Klimawandel. Der Klimaforscher Peter Lemke vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven erklärt, was wir von der Zukunft zu erwarten haben – und wie wir den Entwicklungen vielleicht noch entgegenwirken können.

MIT FRDL. GEN. VON PETER LEMKE

Peter Lemke – hier vor der »Polarstern« – untersucht den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Polareis.

Herr Professor Lemke, Sie haben als einer von über 500 Wissenschaftlern an dem aktuellen Klimabericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mitgewirkt. Was ist die Kernaussage?
Bis zum Jahr 2100 wird sich die globale Temperatur sehr wahrscheinlich im Mittel um 1,8 bis 4 Grad Celsius erhöhen, je nachdem wie viel Kohlendioxid wir in Zukunft produzieren. Das verursacht Gletscherschmelzen, sodass der Meeresspiegel steigt. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts erwarten wir einen Anstieg um 18 bis 59 Zentimeter. Zudem gibt es Anzeichen dafür, dass extreme Wetterereignisse zunehmen werden: Stürme gewinnen an Intensität, Niederschläge fallen stärker aus.

Was verusacht den Klimawandel?
Die Erwärmung der letzten 40 Jahre lässt sich allein mit natürlichen Prozessen nicht erklären – wohl aber mit den Emissionen von Treibhausgasen durch den Menschen. Innerhalb von 250 Jahren haben wir den CO_2-Gehalt der Atmosphäre so stark verändert, wie es üblicherweise in einem Zeitraum zwischen einer Eiszeit und einer Warmzeit in 100 000 Jahren geschieht. Selbst wenn wir ab heute überhaupt kein Kohlendioxid mehr in die Atmosphäre pusten würden, hätten die aktuellen Emissionen noch solche Nachwirkungen, dass sich die Temperatur um ein weiteres halbes Grad erhöhen würde.

Haben sich die Prognosen seit dem letzten IPCC-Report von 2001 verändert?
Der letzte Klimabericht gab bei der Erderwärmung bis 2100 eine Spanne von 1,5 bis 5,8 Grad Celsius an, der Meeresspiegelanstieg wurde auf 9 bis 88 Zentimeter geschätzt. Diese großen Spannen rührten hauptsächlich von zwei Unsicherheiten her: Zum einen wissen wir nicht, wie viel Energie wir tatsächlich in Zukunft verbrauchen werden. Entsprechend können wir nicht genau vorhersagen, wie hoch der zusätzliche CO_2-Gehalt der Atmosphäre bis zum Ende des Jahrhunderts sein wird. Zum anderen ist zu bedenken, dass die Klimamodelle, die es gibt, unterschiedlich sind und zu verschiedenen Szenarien kommen. Für die globale Temperaturerhöhung ist die Spanne der Vorhersagen deshalb seit dem letzten IPCC-Bericht in etwa gleich geblieben, für die Meeresspiegelerhöhung mit 18 bis 59 Zentimeter jedoch deutlich kleiner geworden. Außerdem wurden für andere Klimaparameter detailliertere Aussagen möglich.

Woran liegt das?
Wir konnten auf eine wesentlich größere Anzahl von Klimasimulationen zurückgreifen, die Analysemethoden haben sich verbessert und durch leistungsfähigere Computer sind regional verfeinerte Modelle zum Einsatz gekommen. Außerdem konnten wir die Prognosemodelle durch neue Beobachtungen optimieren. Dadurch sind unsere Vorhersagen nun erheblich umfangreicher und präziser als noch vor fünf Jahren. Dennoch haben sich einige Mittelwerte insgesamt nur wenig verschoben.

Sie selbst haben für den vierten IPCC-Report ein Kapitel über Schnee, Eis und Permafrost koordiniert, das auch die Arktis behandelt. Was hat sich dort verändert?
In den letzten 50 Jahren hat sich die Temperatur in der Arktis um 1,1 Grad Celsius erhöht, während die globale Mitteltemperatur in diesem Zeitraum nur um 0,5 Grad gestiegen ist. Als Folge der starken Erwärmung in der Arktis ging das dortige Meereis pro Jahrzehnt jeweils um 2,7 Prozent zurück. Seit 1973, dem Beginn regelmäßiger Aufzeichnungen zur Ausdehnung der polaren Eisdecke, ist das arktische Eis im Sommer sogar um 22 Prozent geschrumpft.

Ein anderes Problem ist die zunehmende Erosion der arktischen Küstenränder. Denn bei geschlossener Eisdecke bleibt auch der Seegang gering. Wenn das Eis jedoch über einen Großteil des Jahres verschwindet, kann jeder Sturm dort starke Wellen produzieren und die Küsten abtragen. In Sibirien und Alaska wird schon heute so viel Küstenfläche vom Meer zerstört, dass ganze Dörfer umgesiedelt werden müssen.

Wieso erwärmt sich der Nordpol deutlich stärker als der Rest des Globus?
Das Abschmelzen des Eises bewirkt eine sich selbst verstärkende Rückkopplung: Wenn die Sonne auf die weiße Eisfläche scheint, wird die meiste Strahlung reflektiert. Geht aber das Meereis zurück, kommt darunter ein dunkler Ozean zum Vorschein. Der absorbiert mehr Sonnenenergie, erwärmt sich und verstärkt so die Schmelzeffekte. Das ist der so genannte Temperatur-Albedo-Feedback.

Sind die Folgen der Klimaerwärmung beim Südpol ähnlich gravierend?
In der Antarktis ist das merkwürdigerweise anders. Dort ist die Erwärmung noch nicht zu spüren, abgesehen von der Antarktischen Halbinsel, die weit nach Norden reicht. Das Meereis dehnt sich seit 25 Jahren insgesamt gesehen sogar leicht aus. Die Gründe dafür kennen wir noch nicht genau. Aber die Südhemisphäre ist allgemein kälter als die Nordhalbkugel, weil sie von dem riesigen antarktischen Eisschild abgekühlt wird. Er hat etwa 4000 Kilometer Durchmesser und ist an den höchsten Stellen über vier Kilometer mächtig.

Welche Auswirkungen haben die Veränderungen in der Arktis auf das Klima?
Ozeanströmungen und Windsysteme werden durch den Temperaturgegensatz von Tropen und Polargebieten gesteuert. Wenn sich dieser Gegensatz verändert, dann wird sich das auch auf die Windsysteme und die Ozeanströmungen auswirken. So beobachtet man schon heute, dass sich mit dem Zurückweichen des Eises die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete nach Norden verschieben.

Außerdem wird in den Polargebieten das Meerwasser abgekühlt. Das kältere Wasser sinkt nach unten, Tiefenwasser entsteht und treibt eine globale ozeanische Zirkulation an. Diese Umwälzprozesse könnten sich abschwächen. Was zugleich hieße, dass sich das System der Golfstromausläufer ändern würde.

Was hätte das zur Folge?
Nun, zumindest nicht eine solche Abkühlung der Nordhemisphäre, wie sie etwa der Kinofilm »The Day after Tomorrow« zeigt. Das ist Unfug. Dass der Golfstrom sich abschwächt, liegt ja erst einmal an der starken Erwärmung, wegen der Grönland einen Großteil seines Eises verliert. Da wir momentan von Temperatursteigerungen von 2 bis 4 Grad in den nächsten hundert Jahren ausgehen, würde eine Abschwächung des Golfstroms lediglich eine etwas verringerte Erwärmung in Europa bedeuten.

Wie sehen Ihre Prognosen für die Arktis aus, wenn sich an den aktuellen Bedingungen nichts ändert?
Nach allen Szenarien verschwindet das Meereis in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts im Sommer fast vollständig. Wir werden über einen längeren Zeitraum des Jahres freies Wasser in der Arktis und damit auch eine freie Schiffsroute nach Japan haben. Das freut natürlich die Schifffahrt. Erst einmal bedeutet der Rückgang des Meereises aber ebenso, dass die verbleibenden Eisschollen freier beweglich sind und die Schifffahrtswege bedrohen können. Ohne Eisbrecher wird man die Arktis vermutlich deshalb auch in näherer Zukunft nicht durchqueren können. Es ist jedoch nur eine Frage der Zeit, bis die Nordpolarregion im Sommer eisfrei ist.

Für die Eisbären ist das natürlich eine Katastrophe. Doch das Ökosystem dürfte sich insgesamt anpassen. Der Eisbär wird sein Refugium verkleinern, seine Zahl wird abnehmen. Dafür werden sich andere Arten vom Süden her nach Norden wagen und sich neue Nahrungsquellen erschließen. Das spezielle, an das Meereis angepasste Ökosystem wird jedoch deutlichen Schaden nehmen.

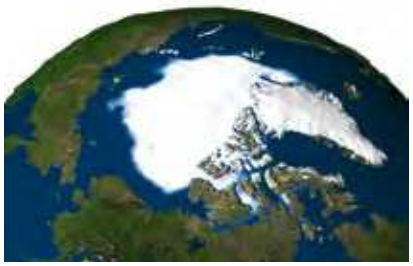
Wo besteht akuter Handlungsbedarf, wenn wir den Klimawandel stoppen wollen?
Die Ursachen des Klimawandels sind ja eigentlich simpel: Wenn man sich den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre für die letzten 650 000 Jahre ansieht, dann lag der bei Eiszeiten etwa bei 180 parts per million oder kurz ppm, in einer Warmzeit bei etwa 280 ppm. Wir haben inzwischen 380 ppm erreicht, und es ist ganz offensichtlich, dass wir in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts bei etwa 550 ppm landen werden. Ich glaube nicht, dass wir diesen Wert noch deutlich verringern können. Unsere Aufgabe ist nun schlicht zu verhindern, dass zu viel CO_2 und andere Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen.

Was sollte man konkret tun?
Man kann natürlich viel beim Energieverbrauch sparen, indem man die Ressourcen effektiver nutzt. Das verschafft etwas Luft. Daneben müssen wir aber neue Energieformen entwickeln. Denn der Rückgriff auf Windräder oder Atomkraftwerke wird uns nicht weiterbringen. Das eine ist nicht effektiv genug, das andere birgt zu hohe Risiken. Die Mittel, die wir bisher zur Verfügung haben, reichen für die Erforschung alternativer Technologien nicht aus. Deshalb muss mehr Geld in diesen Sektor gesteckt werden.

Auch die Suche nach neuen Energieformen und entsprechenden Technologien sollte verstärkt werden. Man könnte beispielsweise in manchen Regionen die Erdwärme besser nutzen oder mit der Sonnenenergie arbeiten. Eine andere Möglichkeit ist, das Kohlendioxid abzufangen und unter der Erde zu bunkern. Auch das würde erst einmal etwas Spielraum verschaffen. Aber hier gibt es noch jede Menge offene Fragen. Es ist etwa noch völlig ungeklärt, wie sicher solche CO_2-Bunker wären und wie man sie richtig verschließen könnte.

Fühlen Sie sich als Klimaforscher von der deutschen Politik ernst genommen?
Ich denke, dass man hier zu Lande weiß, was der Klimawandel bedeutet. Aber unsere Politiker haben auch noch mit anderen Problemen wie der Arbeitslosigkeit zu kämpfen. Die Erderwärmung ist dann nicht immer das Nächstliegende. Vielleicht wird sich erst etwas ändern, wenn die ersten Extremereignisse zugeschlagen haben.

Das Gespräch führte **Tanja Krämer,** freie Wissenschaftsjournalistin in Bremen. Eine ausführlichere Fassung ist unter www.wissenschaft-online.de/artikel/863806 bei spektrumdirekt erschienen.



BEIDE AUFNAHMEN: NASA

Von 1979 bis 2005 ist die Ausdehnung des Meereises in der Arktis im Sommer um 22 Prozent zurückgegangen.

NATIONAL PARK SERVICE, USA

Grüne und purpurne Schwefelbakterien besiedeln heiße Quellen wie diese. Deren Wasser enthält keinen Sauerstoff, dafür aber reichlich Schwefelwasserstoff. Bei Phasen massenhaften Artensterbens in der Vergangenheit waren Schwefelbakterien auch in Ozeanen weit verbreitet. Demnach dürften damals in den Meeren ähnliche Bedingungen wie an dieser Quelle geherrscht haben.

WUNSCHARTIKEL

Tod aus der Tiefe

Sehr wahrscheinlich verursachten nicht Asteroiden, sondern erstickende Hitze und Giftgase, die aus fauligen Ozeanen aufstiegen, die meisten Massenextinktionen der Vergangenheit. Treibt die Erde wieder auf eine solche Treibhauswelt zu?

Von Peter D. Ward

Der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Thomas S. Kuhn behauptete einst, wissenschaftliche Ideengebäude verhielten sich ähnlich wie Lebewesen: Anstatt sich langsam und kontinuierlich zu entwickeln, durchliefen sie lange Phasen der Stagnation, unterbrochen von seltenen Revolutionen, bei denen eine allgemein anerkannte Theorie plötzlich durch ein neues »Paradigma« ersetzt wird – analog etwa zum Untergang der lange die Erde beherrschenden Dinosaurier und dem Aufstieg der Säugetiere.

Diese Charakterisierung trifft speziell auf meinen Forschungsbereich zu: die Untersuchung der Ursachen und Folgen von Massenextinktionen. Bei diesen periodisch wiederkehrenden biologischen Umbrüchen starb jeweils ein großer Teil der Lebewesen auf der Erde aus. Nachher war nichts mehr wie zuvor.

Nachdem die Paläontologen Ende des 18. Jahrhunderts diese Episoden massenhaften Artentods in der Erdgeschichte entdeckt hatten, vermuteten sie dahinter zunächst Vorgänge, die sich über einen längeren Zeitraum hinzogen und durch Klimaänderungen oder Phasen massiven Vulkanismus hervorgerufen wurden. Doch 1980 ereignete sich ein Kuhn'scher Paradigmenwechsel, als der Geologe Walter Alvarez und seine Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in Berkeley das berühmte Dinosauriersterben vor 65 Millionen Jahren als Folge einer plötzlichen ökologischen Katastrophe darstellten, ausgelöst durch den Sturz eines Asteroiden auf die Erde.

In den folgenden zwei Jahrzehnten fand der Gedanke, eine Bombe aus dem All könne jeweils einen großen Teil des irdischen Lebens vernichtet haben, weithin Anklang. Viele Forscher meinten schließlich, dass kosmischer Schutt wohl mindestens drei weitere der fünf größten Artensterben ausgelöst habe. In der Öffentlichkeit verhalfen Hollywood-Reißer wie »Deep Impact« und »Armageddon – Das jüngste Gericht« dieser Vorstellung zu großer Popularität.

Jetzt bahnt sich meines Erachtens erneut ein Umbruch in der Sicht auf die einstigen Massenextinktionen an. Anlass sind neue geochemische Hinweise in den Gesteinsschichten, in denen sich die Katastrophen stratigrafisch abbilden. Für Aufregung sorgt dabei vor allem die Entdeckung organischer Biomarker. Darunter versteht man chemische Überreste winziger Lebensformen, die in der Regel keine Fossilien hinterlassen.

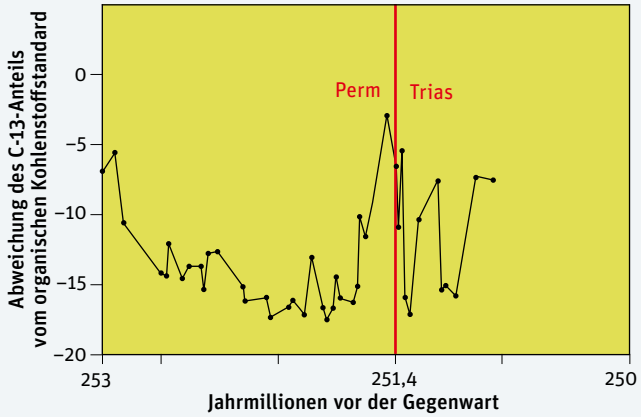
Den neuen, verfeinerten Daten zufolge verursachten Einschläge großer Asteroiden oder Meteoriten offenbar nur einen Teil der Massenextinktionen. In den meisten Fällen scheint die Erde selbst zum schlimmsten Feind des Lebens geworden zu sein – in einer Weise, die sich bisher niemand träumen ließ. Was an dieser Erkenntnis vor allem beunruhigt: Heutige menschliche Aktivitäten könnten die Biosphäre wieder in Gefahr bringen.

Basis der Einschlagtheorie war der Fund von Iridium, das sich in einer Staubschicht, welche die Grenze zwischen der Kreidezeit und dem Tertiär markiert, in ungewöhnlich hoher Konzentration abgelagert hat. Aus der Menge dieses Elements, das auf der Erde sehr selten, in außerirdischen Gesteinen aber recht häufig ist, schloss Alvarez gemeinsam mit seinem Vater, dem Physiker Luis W. Alvarez, sowie den Nuklearchemikern Helen V. Michel und Frank Asaro, dass vor 65 Millionen Jahren ein Asteroid mit einem Durchmesser von etwa zehn Kilometern auf die Erde gestürzt sei. Die ökologischen Folgen dieses Einschlags hätten mehr als die Hälfte aller Tier- und Pflanzenarten ausgelöscht.

Knapp zehn Jahre später fand sich auch die Stelle, wo der mutmaßliche Massenkiller aufgeprallt war: der Chicxulub-Krater vor der Halbinsel Yucatán in Mexiko. Seine Entdeckung zerstreute die letzten Zweifel daran, dass die Herrschaft der Dinosaurier mit einem gewaltigen Feuerwerk zu Ende gegangen war. Zugleich erhob sich die Frage, ob die anderen bekannten Massenextinktionen gleichfalls durch einen Asteroideneinschlag verursacht wurden. Fünfmal innerhalb der letzten 500 Millionen Jahre hörten die meisten irdischen Lebensformen einfach auf zu existieren. ▷

Verschiedene Muster des Artensterbens

Daten über die Häufigkeit des Isotops Kohlenstoff-13 (C-13) in Gesteinsschichten lassen darauf schließen, dass sich zwei der drei letzten großen Massenextinktionen relativ lange hinzogen. Die Atmosphäre enthält umso mehr C-13, je besser die Vegetation gedeiht. Wenn gewaltige Mengen an Pflanzen absterben, sinkt also das Mengenverhältnis von C-13 zu C-12 in der Atmosphäre. In Gesteinsschichten am Ende des Perms (links) und der Trias (Mitte) fiel dieses Verhältnis gegenüber dem heutigen Wert mehrfach für längere Zeit stark ab. Diese Einbrüche lassen auf wiederholte »Schübe« von Artensterben schließen, die sich über Hunderttausende von Jahren hinzogen. Im Gegensatz dazu weist ein einzelner, abrupter C-13-Abfall mit rascher Erholung am Übergang von der Kreide zum Tertiär (rechts) auf eine plötzlich eingetretene ökologische Katastrophe hin.



▷ Zum ersten massenhaften Artentod kam es am Ende des Ordoviziums vor rund 443 Millionen Jahren. Die zweite solche Katastrophe geschah vor 374 Millionen Jahren zum Abschluss des Devons. Im ausgehenden Perm – vor 251 Millionen Jahren – löschte die größte Massenextinktion neunzig Prozent der Meeresbewohner und siebzig Prozent der Pflanzen und Tiere (sogar der Insekten) an Land aus (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 72). Ein weiteres globales Artensterben fand vor 201 Millionen Jahren am Ende der Trias statt. Dem fünften und letzten schließlich fielen vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier zum Opfer.

Anfang der 1990er Jahre prophezeite David M. Raup in seinem Buch »Ausgestorben. Zufall oder Vorsehung?«, dass sich als Auslöser all dieser großen Artensterben und auch der kleineren letztlich Asteroideneinschläge erweisen würden. Die Belege für den Aufprall einer kosmischen Bombe am Übergang zwischen Kreide und Tertiär (K/T) waren überzeugend und sind es noch heute. Außer dem Chicxulub-Krater und der ungewöhnlichen Iridiumschicht umfassen sie auch andere weltweit vorkommende Einschlagspuren wie durch den Druckstoß zerrüttete (»geschockte«) Quarzkristalle oder von Stoßwellen deformierte Gesteine. Ferner dokumentieren chemische Analysen alter Sedimente rasche Veränderungen in der Zusammensetzung der Erdatmosphäre und im Klima als Folge des Impakts.

Reihenweise Killer aus dem All?

Für einige andere Massensterben schienen die Indizien seinerzeit ebenfalls ins All zu weisen. Geologen hatten schon Anfang der 1970er Jahre eine dünne Iridiumschicht mit der Extinktion am Ende des Devons in Verbindung gebracht. Und 2002 legten mehrere Entdeckungen unabhängig voneinander Asteroideneinschläge an den Grenzen Perm/Trias und Trias/Jura nahe. So fanden sich in Gesteinsschichten aus der oberen Trias geringe Spuren von Iridium. Und für das Perm bildeten Fullerene, in deren fußballartigem Kohlenstoffkäfig extraterrestrische Gase eingefangen waren, eine weitere faszinierende Spur (Spektrum der Wissenschaft 7/2002, S. 60).

Viele Wissenschaftler hielten es deshalb für wahrscheinlich, dass Asteroiden oder Kometen vier der fünf großen Massenextinktionen verursacht hätten. Als Ausnahme blieb nur das große Artensterben am Ende des Ordoviziums. Diese Katastrophe schrieben die Forscher einem Stern zu, der nicht weit vom Sonnensystem explodiert sein sollte.

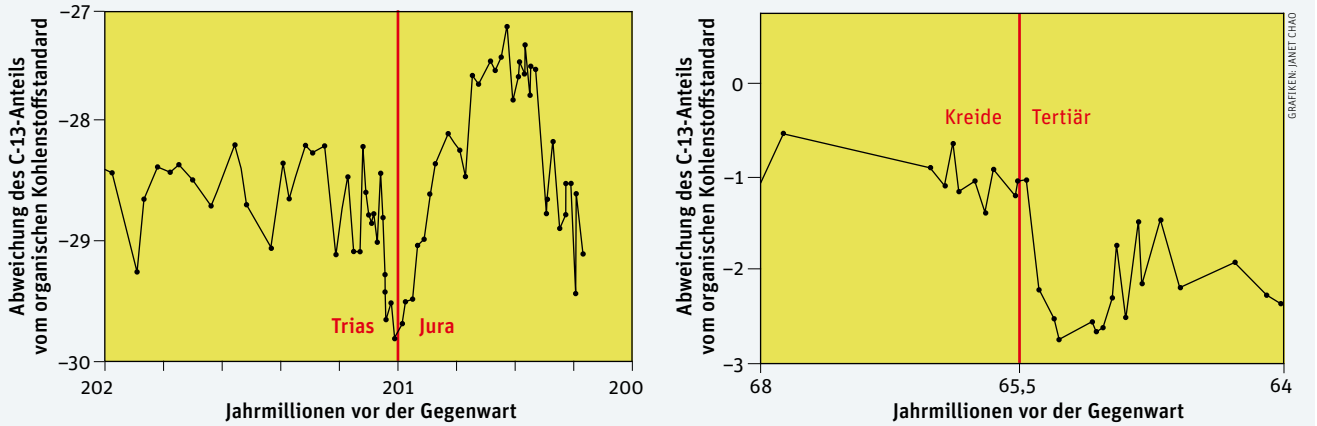
Die genauere Analyse des Datenmaterials in jüngster Zeit ergab jedoch einige Unstimmigkeiten. So legten akribische Auswertungen von Fossilfunden nahe, dass sich die Massenextinktionen am Ende des Perms und der Trias über Hunderttausende von Jahren hinzogen. Zugleich ließen neue Erkenntnisse über heftige Schwankungen des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre darauf schließen, dass die Biosphäre einer lang anhaltenden Serie schwerer Störungen der Umwelt ausgesetzt war und nicht nur einem einzigen katastrophalen Schlag.

Das Massensterben an der KT-Grenze lehrte, dass der Einschlag eines größeren Himmelskörpers einem verheerenden Erdbeben ähnelt, das eine Stadt dem Erdboden gleich macht. Die Katastrophe kommt plötzlich, zerstört alles, aber hält nicht lange an. Nur Tage später beginnt der Wiederaufbau. Beim KT-Ereignis spiegelt sich das rasche Tempo von Zerstörung und anschließender Erholung sowohl in Kohlenstoffisotopen-Daten wider als auch in der Abfolge von Fossilien.

Um Letzteres nachzuweisen, benötigten die Wissenschaftler allerdings einige Zeit. Das plötzliche Aussterben an der KT-Grenze war bei den kleinsten und häufigsten Fossilien – Kalk- und Kiesel-

In Kürze

- Bei mehreren **Massenextinktionen** in den vergangenen 500 Millionen Jahren wurde jeweils über die Hälfte des irdischen Lebens ausgelöscht.
- Eine dieser Katastrophen, bei der unter anderem die Dinosaurier ausstarben, dürfte vom **Einschlag eines Asteroiden** herrühren. Für die anderen gab es bisher keine überzeugende Erklärung.
- Neue Fossilfunde und geochemische Daten weisen auf einen Umweltmechanismus hin, der die meisten größeren und vielleicht auch einige kleinere Extinktionen ausgelöst hat: Als **Folge einer starken globalen Erwärmung** verpesten sauerstofffreie Ozeane die Luft mit giftigem Schwefelwasserstoff.



plankton sowie Pflanzensporen – klar zu erkennen. Je größer aber die Lebewesen, desto mehr schien sich ihr Untergang in die Länge gezogen zu haben.

Erst allmählich begriffen die Paläontologen, dass es sich hierbei womöglich um eine Täuschung handelte. Der Eindruck einer Extinktion in Raten entsteht offenbar nur deshalb, weil große Fossilien in den meisten untersuchten Boden- und Gesteinsschichten ziemlich selten sind. Um diesen Verzerrungseffekt zu eliminieren, entwickelte der Paläontologe Charles Marshall von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) eine neue Methode zur statistischen Analyse der Verbreitung von fossilen Resten. Indem das Verfahren die Wahrscheinlichkeit dafür ermittelt, dass eine bestimmte Spezies innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne ausgestorben ist, holt es sogar aus seltenen Fossilien ein Maximum an Informationen heraus.

Im Jahr 1996 taten Marshall und ich uns zusammen, um sein System an stratigrafischen Profilen von der KT-Grenze zu testen. Dabei betrachteten wir speziell in Europa gefundene Ammoniten. Diese Weichtiere mit schneckenartigem, gekammertem Gehäuse, die mit dem heute noch lebenden Perlboot (Nautilus) verwandt sind, kommen unter den größeren fossilen Meerestieren am häufigsten vor. Lange hatte ihr Aussterben als allmählicher Vorgang gegolten. Doch jetzt erwies sich, dass das zeitliche Muster der Fossilfunde sehr wohl mit einer plötzlichen Extinktion an der KT-Grenze vereinbar ist.

Bei den früheren Massensterben lieferten analoge Analysen durch verschiedene Forscher, mich eingeschlossen, jedoch ein anderes Bild. So sprachen Untersuchungen meiner Gruppe an Gesteinsschichten, die sowohl marine als auch nicht-marine Milieus gegen Ende des Perms und der Trias repräsentierten, für ein allmählicheres Artensterben, das an der stratigrafischen Grenze jeweils kulminierte.

Gleiches galt für die Verteilung der Kohlenstoffisotope – ein weiterer Anhaltspunkt für Aussterbegeschwindigkeiten. Kohlenstoffatome kommen in drei Sorten vor. Diese so genannten Isotope unterscheiden sich in der Anzahl der im Kern enthaltenen Neutronen. Viele Menschen kennen das Isotop Kohlenstoff-14 (C-14), weil seine Zerfallsrate oft zur Datierung fossiler Skelette oder alter Sedimentproben dient. Für Aussagen über die Dauer eines Extinktionsvorgangs ist jedoch das Verhältnis zwischen den Isotopen C-13 und C-12 besser geeignet, da sich darin widerspiegelt, wie gut pflanzliches Leben zur fraglichen Zeit gedieh. Durch die Photosynthese verschiebt sich dieser Wert nämlich erkennbar.

Pflanzen produzieren mit Hilfe der Sonnenenergie aus Kohlendioxid (CO_2) und Wasser organische Verbindungen, die sie zum Aufbau ihrer Zellen und als Energiequelle benötigen. Dabei wird bevorzugt CO_2 mit dem Isotop C-12 umgesetzt, da es wegen seiner geringeren Masse etwas reaktionsfreudiger ist als das Molekül mit dem schwereren C-13. Bei reichlichem Vorhandensein pflanzlichen Lebens – sei es in Form von Photosynthese treibenden Mikroben, im Meer treibenden Algen oder höheren Pflanzen an Land – bleibt daher eine größere Menge C-13 in der Atmosphäre zurück, und sein Anteil im CO_2 der Luft steigt.

Das Kohlenstoff-Isotopenverhältnis in Proben aus der Zeit vor, während und nach einem Massensterben liefert also einen verlässlichen Indikator dafür, wie sich die Menge pflanzlichen Lebens sowohl an Land als auch im Meer verändert hat. Die betreffende Grafik für das Extinktionsereignis an der KT-Grenze ist schlicht und klar. Praktisch zeitgleich mit der Ablagerung der Schicht, die mineralogische Hinweise auf den Einschlag eines Himmelskörpers enthält, sackt der Anteil von C-13 drastisch ab, steigt aber bald wieder. Das spricht für ein plötzliches Absterben der Vegetation und eine rasche Erholung – in Einklang mit dem Häufigkeitsmuster von Fossilien sowohl größerer Landpflanzen als auch mikroskopisch kleinen Meeresplanktons: Beide Gruppen erlitten starke Verluste bei der KT-Massenextinktion, vermehrten sich danach jedoch rasch wieder.

Katastrophe in Raten

Im Gegensatz dazu dokumentieren die Kohlenstoffprofile, die meine Arbeitsgruppe Anfang 2005 für das Perm und kürzlich auch für die Trias ermittelte, ein ganz anderes Schicksal von Pflanzen und Plankton während dieser zwei Extinktionsphasen. In beiden Fällen zeigen mehrfache Isotopenverschiebungen, die sich jeweils über Zeiträume von 50 000 bis mehr als 100 000 Jahren erstreckten, dass die Pflanzengemeinschaften stark dezimiert wurden, sich wieder erholten und durch das nächste Extinktionsereignis erneut fast ausstarben (siehe Kasten oben).

Damit ein solches Muster entsteht, müsste im Abstand von einigen Jahrtausenden jeweils ein Asteroid auf die Erde geprallt sein. Doch es gibt keinerlei mi- ▷

neralogische Hinweise auf eine Serie von Einschlägen zu einem der beiden fraglichen Zeiträume. Stattdessen wecken neuere Untersuchungen Zweifel, ob damals überhaupt ein Impakt stattgefunden hat.

So konnte seit dem Bericht, wonach Schichten des oberen Perms mit extraterrestrischem Gas gefüllte Fullerene enthalten sollen, keine andere Forschergruppe diesen Fund bestätigen. Eine zunächst bekannt gegebene Entdeckung von geschocktem Quarz aus dieser Zeit musste zurückgezogen werden. Auch gibt es kein Einvernehmen darüber, ob Krater in der Tiefsee bei Australien und unter dem antarktischen Eis, die von dem vermuteten Einschlag stammen sollen, nicht in Wahrheit gewöhnliche irdische Bildungen sind. Das in der oberen Trias gefundene Iridium wiederum liegt in so geringer Konzentration vor, dass es allenfalls den Einschlag eines kleinen Himmelskörpers bezeugt, nicht aber den eines kilometerdicken Brockens, der – wie an der KT-Grenze – fast alles Leben vernichtete.

Wenn diese Massensterben aber nicht von kosmischen Bomben herrührten, was löste sie dann aus? Neuerdings gibt es Hinweise darauf, dass die Erde selbst ihre Bewohner weit gehend auslöschen kann und dies in der Vergangenheit wohl auch mehrfach getan hat.

Vor rund fünf Jahren begannen kleine Gruppen von Geologen, gemeinsam mit organischen Chemikern die Umweltbedingungen in kritischen Momenten der Erdgeschichte zu untersuchen. Die Idee war, organische Überreste aus alten Schichten zu extrahieren, um auf diese Weise »chemische Fossilien« aufzuspüren. Einige Lebewesen hinterlassen nämlich widerstandsfähige organische Moleküle, die den Zerfall ihrer Körper überleben und in Sedimentgesteine eingeschlossen werden. Diese so genannten Biomarker können als Hinweis auf einstige Lebensformen dienen, die keine Skelett-Fossilien hinterlassen haben. Das gilt beispielsweise für Einzeller. Von etlichen Mikrobenarten sind Spuren der Lipide (Fette und fettähnlichen Substanzen) in ihren Zellmembranen erhalten, die sich mit neuen Methoden der Massenspektrometrie aufspüren lassen. Dabei werden die Moleküle nach ihrer Masse getrennt und identifiziert.

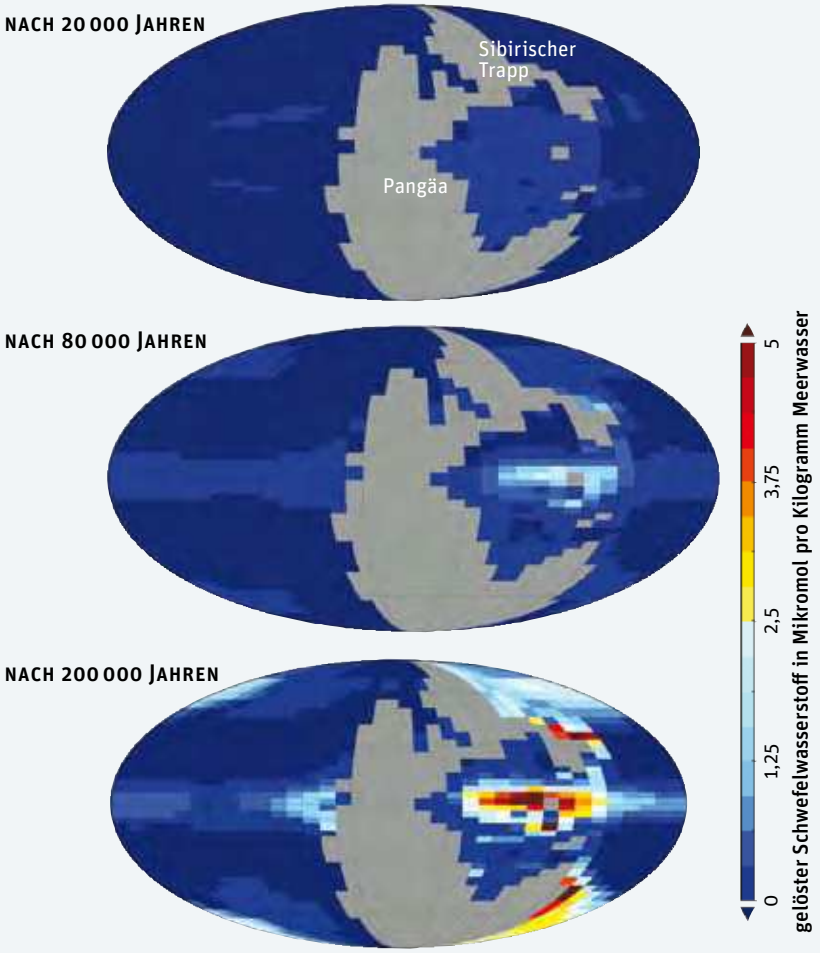
Biomarker zeigen Meere ohne Sauerstoff

Anfangs konzentrierte sich diese Suche auf Biomarker in Gesteinen, die sich zu einer Zeit gebildet hatten, als es noch keine Tiere und Pflanzen auf der Erde gab. So wollte man feststellen, wann und unter welchen Bedingungen das irdische Leben entstand. In den letzten Jahren analysierten Forscher aber auch zunehmend Gesteinsproben aus Schichtgrenzen, an denen sich Massenextinktionen ereignet hatten. Zu ihrer großen Überraschung ließen die erhaltenen Daten darauf schließen, dass damals – außer beim Übergang von der Kreide zum Tertiär – die Weltmeere wiederholt in den gleichen anoxischen, also fast sauerstofffreien Zustand zurückgefallen waren, wie er herrschte, als es noch kaum Pflanzen und Tiere auf unserem Planeten gab.

Zu den entdeckten Biomarkern gehören Überreste unzähliger Photosynthese treibender grüner Schwefelbakterien. Heute leben diese Mikroben gemeinsam mit ihren Verwandten, den ebenfalls phototrophen Schwefelpurpurbakterien, in anoxischem Wasser, wie es sich in den Tiefen stehender Seen und im Schwarzen Meer findet. Als Elektronenspender für die Photosynthese benutzen sie statt Wasser gasförmigen Schwefelwasserstoff (H_2S), der für die meisten anderen Orga-

Schleichende Vergiftung

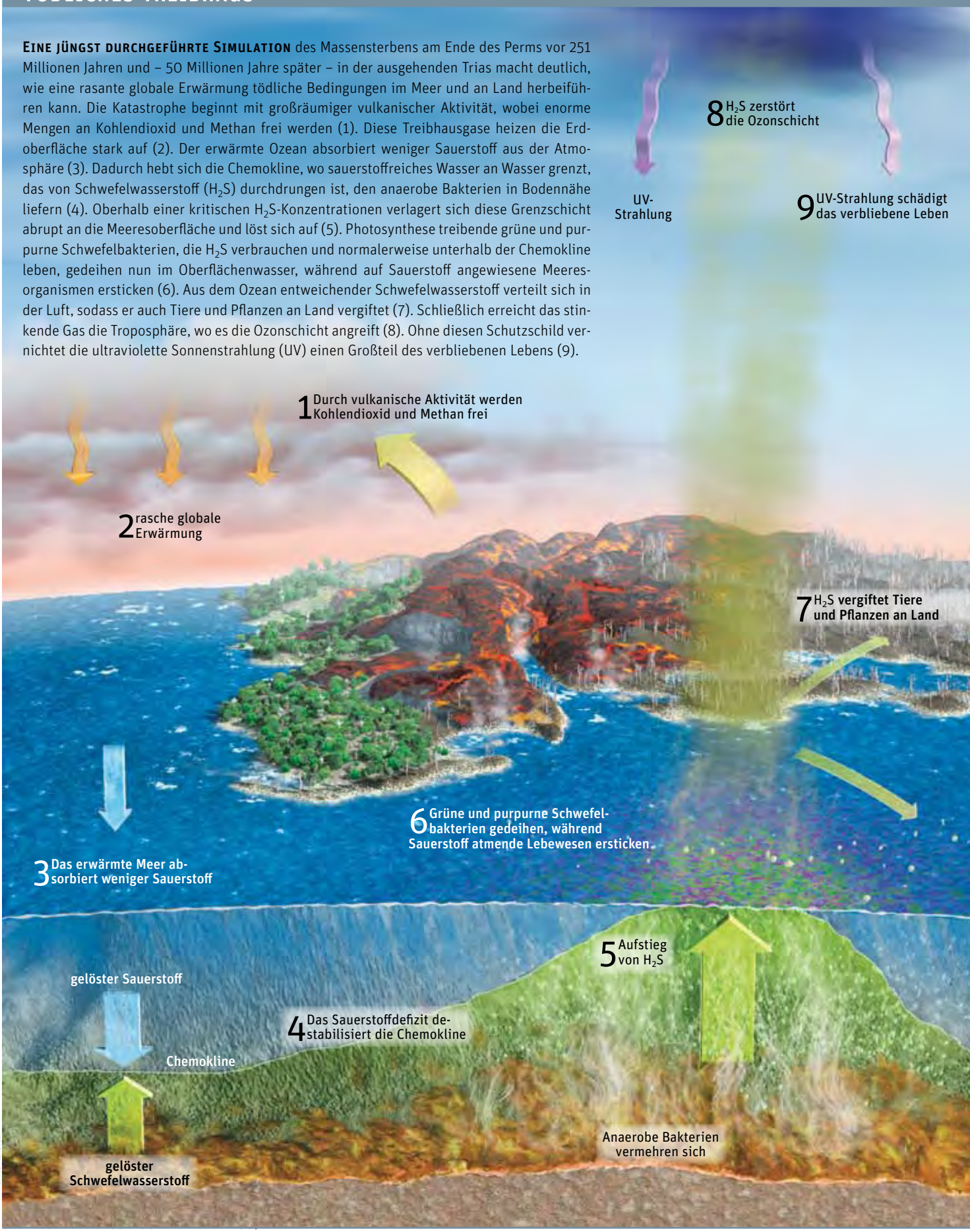
Am Ende des Perms nahm in einem Teil der Weltmeere die Konzentration an giftigem Schwefelwasserstoff im oberflächennahen Wasser zu und die an Sauerstoff entsprechend ab. Das ergibt sich aus einem Computermodell, das Katja M. Meyer und Lee R. Kump von der Pennsylvania State University in University Park entwickelt haben. Auslöser der Vergiftung war demnach großräumige vulkanische Aktivität, die vor rund 251 Millionen Jahren die riesigen Plateaubasalte des Sibirischen Trapps innerhalb des Superkontinents Pangäa schuf. Das dabei freigesetzte Kohlendioxid verursachte eine rasante globale Erwärmung, die sich auf die Chemie und Biologie der Ozeane auswirkte und so die ökologische Katastrophe in Gang brachte.



KATJA M. MEYER & LEE R. KUMP, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY / NASA ASTROBIOLOGY INSTITUTE

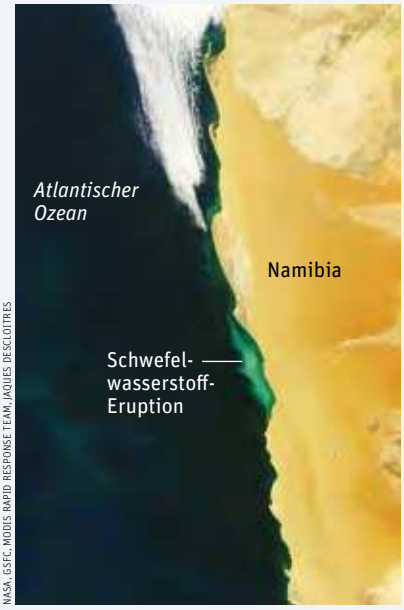
Tödliches Treibhaus

Eine jüngst durchgeführte Simulation des Massensterbens am Ende des Perms vor 251 Millionen Jahren und – 50 Millionen Jahre später – in der ausgehenden Trias macht deutlich, wie eine rasante globale Erwärmung tödliche Bedingungen im Meer und an Land herbeiführen kann. Die Katastrophe beginnt mit großräumiger vulkanischer Aktivität, wobei enorme Mengen an Kohlendioxid und Methan frei werden (1). Diese Treibhausgase heizen die Erdoberfläche stark auf (2). Der erwärmte Ozean absorbiert weniger Sauerstoff aus der Atmosphäre (3). Dadurch hebt sich die Chemokline, wo sauerstoffreiches Wasser an Wasser grenzt, das von Schwefelwasserstoff (H_2S) durchdrungen ist, den anaerobe Bakterien in Bodennähe liefern (4). Oberhalb einer kritischen H_2S-Konzentrationen verlagert sich diese Grenzschicht abrupt an die Meeresoberfläche und löst sich auf (5). Photosynthese treibende grüne und purpurne Schwefelbakterien, die H_2S verbrauchen und normalerweise unterhalb der Chemokline leben, gedeihen nun im Oberflächenwasser, während auf Sauerstoff angewiesene Meeresorganismen ersticken (6). Aus dem Ozean entweichender Schwefelwasserstoff verteilt sich in der Luft, sodass er auch Tiere und Pflanzen an Land vergiftet (7). Schließlich erreicht das stinkende Gas die Troposphäre, wo es die Ozonschicht angreift (8). Ohne diesen Schutzschild vernichtet die ultraviolette Sonnenstrahlung (UV) einen Großteil des verbliebenen Lebens (9).



DAVID FIERSTEIN

Katastrophe im Kleinformat



NASA, GSFC, MODIS RAPID RESPONSE TEAM, JAQUES DESCLOITRES

Schwefelwasserstoff-Eruptionen vor der Küste Namibias erscheinen auf diesem Satellitenfoto als blassgrüne Wirbel im Wasser. Bei diesem wiederkehrenden lokalen Phänomen steigt das von Bakterien in Sedimenten am Meeresboden gebildete giftige Gas bis an die Meeresoberfläche auf. Dabei vermittelt es einen kleinen Eindruck von den mutmaßlichen Verhältnissen bei mehreren Massenextinktionen während der Erdgeschichte, als weltweit H_2S aus dem Tiefenwasser empordrang: Stinkbombenartiger Schwefelgestank erfüllt die Luft, tote Fische treiben im Wasser und vom Ersticken bedrohte Hummer fliehen vor dem Gift auf die Strände.

▷ nismen giftig ist, und wandeln ihn in Schwefel um. Ihr reichliches Vorkommen in Zeiten massenhaften Artensterbens weist so den Weg zu einer neuen Sicht auf die Ursache dieser Katastrophen.

Schon lange war bekannt, dass die Meere bei großen Extinktionsereignissen weniger Sauerstoff enthielten als heute. Allerdings wurde der Grund dafür nie hinreichend geklärt. Großräumige vulkanische Aktivität, wie sie bei den meisten Massensterben auftrat, könnte einen Anstieg der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre und dadurch eine starke globale Erwärmung verursacht haben. Lange Zeit war dies eine alternative Theorie zu den Asteroideneinschlägen. Die Auswirkungen des Vulkanismus erklären jedoch nicht ohne Weiteres, warum gegen Ende des Perms massenhaft Lebensformen im Meer zu Grunde gingen. Auch das Aussterben von Landpflanzen lässt sich damit schwerlich erklären; denn die Vegetation sollte vom erhöhten CO_2-Gehalt der Atmosphäre sogar profitieren und die Erwärmungsphase somit überleben.

Die Biomarker in den Meeressedimenten aus dem letzten Abschnitt des Perms und den jüngsten Gesteinen der Trias liefern chemische Hinweise auf eine Blüte der H_2S konsumierenden Bakterien in allen Weltmeeren. Diese Mikroben können nur in einer sauerstofffreien Umgebung leben, benötigen jedoch Sonnenlicht für ihre Photosynthese. So ist ihr Vorkommen in Schichten, die Flachmeerablagerungen repräsentieren, schon an sich ein Zeichen dafür, dass das oberflächennahe Wasser der Ozeane am Ende des Perms anoxisch und mit H_2S gesättigt war.

Zerstörung der Ozonschicht

Die heutigen Meere enthalten Sauerstoff in für das Leben ausreichenden, konstanten Konzentrationen von der Oberfläche bis zum Grund, weil das Wasser das Gas aus der Atmosphäre aufnimmt und durch Zirkulationsströmungen in die Tiefe befördert. Nur unter ungewöhnlichen Umständen wie denen im Schwarzen Meer herrschen schon ab einer Tiefe von etwa 150 Metern anoxische Bedingungen, sodass eine breite Palette von Organismen, die keinen Sauerstoff vertragen, in der Wassersäule gedeiht.

Die in größeren Tiefen lebenden anaeroben Mikroben produzieren ständig große Mengen an Schwefelwasserstoff, der sich im Meerwasser löst. Mit zunehmender Konzentration wandert das H_2S nach oben, wo es schließlich auf Sauerstoff trifft, der nach unten diffundiert. So entsteht eine Grenzschicht zwischen beiden, die so genannte Chemokline.

Die Lage dieser Schicht, die mit Sauerstoff und mit Schwefelwasserstoff gesättigtes Wasser trennt, bleibt stabil, solange keine Störung des Gleichgewichts auftritt. Hier leben in der Regel die grünen und purpurnen Schwefelbakterien, da sie von unten Schwefelwasserstoff und von oben Sonnenlicht erhalten.

Bei Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Ozean werden die Bedingungen für die anaeroben Bakterien in der Tiefe natürlich günstiger, sodass sie sich stark vermehren und größere Mengen an Schwefelwasserstoff produzieren. Die Geowissenschaftler Lee R. Kump und Michael A. Arthur von der Pennsylvania State University in University Park haben die Folgen einer solchen Anoxie-Phase in Computermodellen berechnet. Das Resultat: Wenn die H_2S-Konzentration in tiefen Wasserschichten einen kritischen Schwellenwert übersteigt, kann sich die Chemokline abrupt an die Oberfläche verlagern. Dann wird das Meer zur stinkenden Kloake, aus der giftiger Schwefelwasserstoff ausgast und die Atmosphäre verpestet.

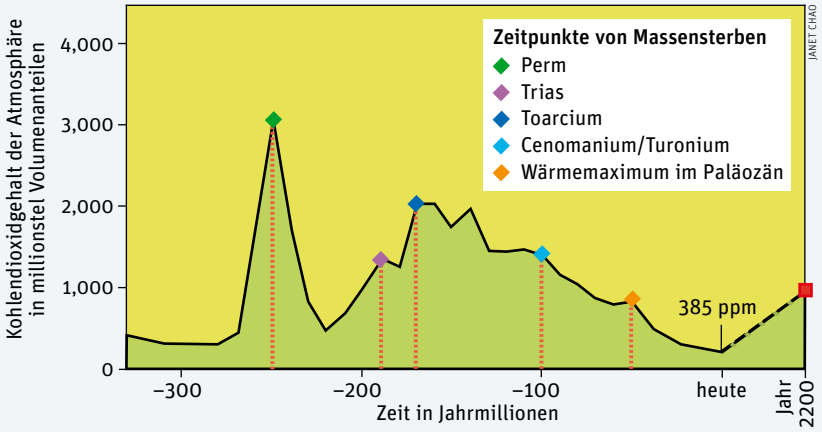
Nach den Berechnungen der beiden Forscher dürfte das H_2S, das bei solchen Ereignissen am Ende des Perms produziert wurde, ausgereicht haben, ein Massensterben sowohl im Meer als auch an Land auszulösen (siehe Kasten auf S. 30). Doch damit nicht genug: Wie Modellierungen durch Alexander Pavlov von der Universität von Arizona in Tucson zeigen, hätte der Schwefelwasserstoff zugleich die irdische Ozonschicht angegriffen, die das Leben vor der ultravioletten Sonnenstrahlung schützt.

Tatsächlich liefern fossile Sporen aus Grönland Hinweise auf eine Zerstörung dieses Schutzschilds am Ende des Perms. Missbildungen, die sie aufweisen, deuten darauf hin, dass sie längere Zeit hoher UV-Strahlung ausgesetzt waren. Aus demselben Grund schrumpft, wie Untersuchungen ergaben, heute unter dem Ozonloch in der Antarktis die Biomasse des pflanzlichen Planktons. Wenn aber die Basis der Nahrungskette zerstört ist, leiden über kurz oder lang auch die Lebewesen auf höheren Stufen.

Nach Schätzungen von Kump und Arthur entwich gegen Ende des Perms mehr als das Zweitausendfache dessen, was heutige Vulkane an Schwefelwasserstoff ausstoßen, aus den Ozeanen in die Atmosphäre. Damit erreichte das Gas in der Luft eine Konzentration, in der es viele Tiere und Pflanzen gleichermaßen tötete. Das gilt umso mehr, als seine Giftigkeit mit der Temperatur zunimmt. Auch andere größere und kleinere Extinktions-

Steuern wir auf ein Massensterben zu?

Bei allen vergangenen Massenextinktionen enthielt die Atmosphäre sehr viel von dem Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2). Das unterstreicht die Rolle der globalen Erwärmung. Heute beträgt der CO_2-Gehalt der Luft 385 millionstel Volumenanteile (ppm). Bei einem prognostizierten Anstieg von 2 bis 3 ppm pro Jahr würde der Wert gegen Ende des nächsten Jahrhunderts 900 ppm erreichen – kaum weniger als beim Massensterben während des paläozänen Wärmemaximums vor 54 Millionen Jahren.



ereignisse scheinen während kurzer Intervalle globaler Erwärmung stattgefunden zu haben. Hier nun kommt die vulkanische Aktivität ins Spiel.

Ungefähr zeitgleich mit mehreren Massensterben ereigneten sich größere Vulkanausbrüche, bei denen Lava in riesigen Mengen austrat und Tausende von Quadratkilometern auf dem Festland oder am Meeresboden überflutete. Nebenher dürften enorme Mengen vulkanischer Gase – hauptsächlich Kohlendioxid, aber auch Methan – freigesetzt worden sein, die eine rasche globale Erwärmung verursachten. Tatsächlich schoss, wie die Analyse der Kohlenstoff-Isotope in den betreffenden Schichten belegt, gegen Ende des Devons, des Perms und der Trias, desgleichen im frühen Jura, in der mittleren Kreide und im ausgehenden Paläozän sowie in weiteren Perioden, in denen bedeutende Artensterben stattfanden, kurz zuvor jeweils der CO_2-Gehalt der Atmosphäre in die Höhe und blieb dann für hunderttausende bis einige Millionen Jahre auf diesem Niveau.

Keine Lebensform blieb verschont

Entscheidend aber dürfte die Auswirkung auf die Ozeane gewesen sein. Warmes Wasser kann weniger Sauerstoff aus der Atmosphäre aufnehmen. Das begünstigt anoxische Bedingungen im Meer. Dadurch konnten anaerobe Tiefseebakterien besser gedeihen und mehr H_2S produzieren, das immer weiter nach oben vordrang. Zuerst und am härtesten hätte dies Sauerstoff atmende Lebewesen im Ozean getroffen. Für die Photosynthese treibenden grünen und purpurnen Schwefelbakterien wären die Lebensbedingungen an der Oberfläche des sauerstofffreien Meeres dagegen ideal gewesen.

Da der Schwefelwasserstoff die Landbewohner erstickte und die UV-Schutzschicht der Erde beschädigte, blieb so gut wie keine Lebensform verschont. Kumps Hypothese stellt also eine Verbindung zwischen dem marinen und dem terrestrischen Massensterben her. Vulkanismus und erhöhte CO_2-Werte könnten beides zugleich verursacht haben. Diese Theorie erklärt auch, warum zum Beispiel in allen Fundstätten des ausgehenden Perms seltsamerweise Schwefel vorkommt. Der Umstand, dass sowohl der Ozean als auch die Atmosphäre vergiftet waren, macht zudem verständlich, weshalb sich das Leben nach dem Massenaussterben nur sehr allmählich regenerierte.

Interessanterweise hatten Wissenschaftler zuvor schon das weniger massive Artensterben am Ende des Paläozäns – vor 54 Millionen Jahren – einer Phase mit Sauerstoffarmut im Meer zugeschrieben, ausgelöst durch eine vorübergehende globale Erwärmung. Betrachtet man die hier diskutierte Vielzahl der Fälle, scheinen durch den Treibhauseffekt ausgelöste extreme Extinktionsereignisse also ein immer wiederkehrendes erdgeschichtliches Phänomen zu sein.

Das wirft die Frage auf, ob unserer Spezies durch diesen Mechanismus Gefahr droht. Was in der Vergangenheit mehrfach passierte, könnte sich durchaus wieder ereignen. Schätzungen darüber, wie schnell der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre während der früheren Massenextinktionen anstieg, sind zwar noch ungenau. Aber wir kennen die Grenzwerte, ab denen es zur Katastrophe kam.

Während des Wärmemaximums im späten Paläozän lag der CO_2-Gehalt der Atmosphäre knapp unter 1000 millionstel Volumenanteilen (*parts per million*, ppm), am Ende der Trias etwas darüber. Heute, bei ungefähr 385 ppm, scheinen wir also auf der sicheren Seite zu sein. Wenn dieser Wert jedoch, wie prognostiziert, um zwei und demnächst wahrscheinlich sogar drei ppm pro Jahr ansteigt, könnten wir gegen Ende des nächsten Jahrhunderts 900 ppm erreichen. Das ließe in der Tat befürchten, dass es zu anoxischen Bedingungen in den Ozeanen kommt. Wie viel Zeit bliebe dann noch bis zu einem erneuten, durch den Treibhauseffekt verursachten Massensterben? Wir sollten es nicht dazu kommen lassen, das herausfinden zu müssen. ◁

Peter D. Ward ist Geologieprofessor im Sektor Erd- und Raumwissenschaften an der Universität von Washington in Seattle. Er interessiert sich speziell für paläontologische Themen und erforscht für das Astrobiologische Institut der Nasa potenzielle außerirdische Lebensräume. Für Spektrum der Wissenschaft hat er schon den Artikel »Nautilus und Ammoniten« (12/1983, S. 68) verfasst und war Koautor des Beitrags »Lebensfeindliches All« (12/2001, S. 38).

Massive release of hydrogen sulfide to the surface ocean and atmosphere during intervals of oceanic anoxia. Von Lee R. Kump et al. in: Geology, Bd. 33, S. 397, Mai 2005

Abrupt and gradual extinction among late permian land vertebrates in the Kairoo Basin, South Africa. Von Peter D. Ward et al. in: Science, Bd. 307, S. 709, 4. 2. 2005

Photic zone euxinia during permian-triassic superanoxic event. Von Kliti Grice et al. in: Science, Bd. 307, S. 706, 4. 2. 2005

Rivers in time: the search for clues to earth's mass extinctions. Von Peter D. Ward. Columbia University Press, 2002

Weblinks zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864271.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

ROBOTFIGUR: MARK HO; FOTO: LOUIS LEMAIRE

Roboter

Vom automatischen Altenpfleger bis zum ferngesteuerten Chirurgen: Bald werden Roboter alle Bereiche unserer Lebenswelt prägen – behauptet der Mitbegründer von Microsoft.

Ein Roboter aus einem Sciencefiction-Film? Falsch, es ist die Skulptur *Artform No. 1* des niederländischen Künstlers Mark Ho.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

für jedermann

Von William H. Gates III.

Merken Sie, dass Sie gerade die Geburt eines neuen Industriezweigs erleben? Die Geburt einer Industrie, die völlig neuartige Technologien entwickelt? Schon jetzt liefern einschlägige Unternehmen spezialisierte Geräte an die Industrie und junge Firmen bringen innovative Spielsachen, Geräte für Hobbybastler und andere interessante Dinge auf den Markt. Doch die Erfinder arbeiten nicht auf einer einheitlichen Grundlage, sie können sich an wenigen Standards orientieren. Neue Projekte sind komplex, der Fortschritt langsam und praktische Anwendungen noch selten. Das klingt aufregend und viel versprechend, aber keiner weiß genau, ob sich dieser Industriezweig durchsetzt – und falls ja, wann. Geschähe dies jedoch, würde er die Lebenswelt der Menschen tief greifend verändern.

Diese Sätze könnten den Zustand der Computerindustrie Mitte der 1970er Jahre beschreiben, als Paul Allen und ich die Firma Microsoft gründeten. Damals übernahmen große, teure Computer die Rechenarbeiten von Firmen, Regierungsbehörden und anderen Institutionen, während Forscher in der Industrie und an Universitäten Grundlagenwissen für das Informationszeitalter schufen. Intel hatte gerade den Mikroprozessor 8080 eingeführt und Atari verkaufte das beliebte Telespiel Pong. In Computerklubs organisierte Amateure versuchten herauszufinden, wofür diese neue Technologie gut sein könnte.

Tatsächlich denke ich jedoch an die Gegenwart: die Entstehung einer Roboterindustrie, die sich heute vollzieht und in mancher Weise an die Einführung der Computer vor dreißig Jahren erinnert. Produktionsroboter in der Automobilindustrie können wir mit den Großrechnern von gestern vergleichen. Nischenprodukte dieser Industrie sind Roboterarme, die chirurgische Eingriffe durchführen, Suchroboter, die im Irak oder in Afghanistan Minen aufspüren, sowie Haushaltsroboter, die selbstständig den Boden saugen. Elektronikfirmen verkaufen inzwischen Roboterspielzeuge, die Menschen, Hunde oder Dinosaurier mehr oder weniger gut imitieren. Manche Bastler sind ganz aufgeregt, wenn sie die neueste Version des Robotertechnik-Baukastens der Firma Lego in die Hände bekommen.

Einige der besten Köpfe der Welt arbeiten daran, die kniffligsten Probleme der Robotertechnik zu lösen. Schwierig ist es vor allem, die Geräte zur optischen Wahrnehmung der Umwelt zu befähigen, sich auf Grund selbstständig gewonnener Informationen zu bewegen sowie neue Routinen zu erlernen. Damit kommen die Experten jedoch erstaunlich gut voran. Vor drei Jahren schrieb Darpa, eine Agentur zur Forschungsförderung des US-Verteidigungsministeriums, einen Wettbewerb mit dem Namen »Grand Challenge« (Große Herausforderung) aus.

Teilnehmende Roboterfahrzeuge sollten versuchen, eigenständig knapp 230 Kilometer über eine raue Piste durch die Mojave-Wüste in Kalifornien zu fahren. Im Jahr 2004 schaffte das beste Fahrzeug gerade einmal 12 Kilometer, bevor es kaputtging. Im nächsten Jahr erreichten bereits fünf Fahrzeuge die Ziellinie. Der Gewinner hatte eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde erreicht. Ins Bild der vergleichbaren Entwicklung von Computer- und Robotertechnik passt, dass die Darpa vor 30 Jahren das Arpanet finanziert hatte, den Vorgänger des Internets.

Heute kämpfen Roboterhersteller mit ähnlichen Problemen wie wir vor drei ▷

In Kürze

- Die heutige Situation der Roboterindustrie ähnelt dem Zustand der Computerindustrie vor dreißig Jahren. Weil es **kaum gemeinsame Standards** und Plattformen gibt, müssen Entwickler oft bei null anfangen, wenn sie neue Maschinen entwickeln wollen.
- Noch fällt es Robotern schwer, schnell ihre Umgebung wahrzunehmen und auf sie zu reagieren. Da die **Kosten für Rechenleistung und Sensoren deutlich gesunken** sind, werden Forscher dieses Problem bald meistern.
- Entwickler schreiben mit Sammlungen von Hilfsroutinen Programme, die auf unterschiedlicher Hardware laufen. Sind **Roboter mit Netzwerken verbunden**, können sie die Rechenleistung von Heimcomputern nutzen, um Aufgaben wie die optische Erkennung und Navigation zu bewältigen.

▷ Jahrzehnten. Sie verfügen über kein einheitliches Betriebssystem, das es Anwenderprogrammen erlaubte, auf unterschiedlichen Geräten zu laufen. Noch gibt es kaum einheitliche Standards für die Prozessoren und die mechanischen Bestandteile der Roboter. Ein Programm, das für eine bestimmte Maschine entwickelt wurde, kann deshalb nur selten in einer anderen eingesetzt werden. Wer einen neuen Roboter bauen möchte, muss meist ganz von vorn anfangen.

Von der Fronarbeit zur Haushaltshilfe

Spreche ich jedoch mit Leuten, die sich mit Robotertechnik beschäftigen, seien es nun Forscher und Studenten an Universitäten, Unternehmer oder Bastler, erinnert mich ihre Begeisterung an die Zeit, als Paul Allen und ich angesichts der neuen technischen Möglichkeiten davon träumten, dass irgendwann auf jedem Schreibtisch und in jedem Haus ein Computer stehen könnte.

Angesichts dieser Tendenzen stelle ich mir eine Zukunft vor, in der roboterähnliche Geräte zu einem fast allgegenwärtigen Bestandteil unseres täglichen Lebens werden. Bereits existierende Technologien wie dezentrales Rechnen, Sprach- und Mustererkennung sowie drahtlose Breitbandverbindungen werden die Tür zu einer neuen Generation selbstständiger Geräte öffnen, die für Menschen Aufgaben in ihrer Umwelt erledigen. Wir befinden uns am Anfang eines Zeitalters, in dem der PC gewissermaßen von unserem Schreibtisch aufsteht und uns dazu verhilft, anderswo Dinge zu sehen, zu hören, zu berühren und zu verändern.

Lange bevor der tschechische Schriftsteller Karel Čapek 1921 das Wort »Roboter« prägte – *Robota* ist das tschechische Wort für Fronarbeit –, träumten Menschen von roboterartigen Geräten. In der griechischen und römischen Mythologie baute Hephaistos, der Gott der Schmiedekunst, mechanische Diener aus Gold. Vermutlich im 1. Jahrhundert n. Chr. erfand der Ingenieur Heron von Alexandria die erste Dampfmaschine und entwarf faszinierende Automaten – angeblich sogar einen, der sprechen konnte. Leonardo da Vincis Skizze von 1495 eines mechanischen Ritters, der sich aufsetzen und seine Arme und Beine bewegen konnte, war der erste Plan eines menschenähnlichen Roboters.

Im Lauf des letzten Jahrhunderts wurden Maschinen in Menschengestalt zu vertrauten Wesen, ob in Isaac Asimovs Buch »Meine Freunde, die Roboter« oder in Filmen wie »Krieg der Sterne« und »Raumschiff Enterprise«. Dass Roboter in der Literatur so beliebt sind, lässt vermuten, dass Menschen diese Maschinen eines Tages als ihre Helfer und vielleicht sogar als Gefährten akzeptieren werden. Doch obwohl Roboter bereits jetzt aus der Automobilindustrie kaum wegzudenken sind – allein in Deutschland werden dort mehr als 50 000 eingesetzt –, können existierende Maschinen noch längst nicht mit denen aus der Sciencefiction-Literatur mithalten. Es ist viel schwieriger, als man denkt, Computern beizubringen, ihre Umgebung wahrzunehmen und schnell und genau genug darauf zu reagieren. Für Menschen ist es ganz einfach, sich in einem Raum anhand der darin vorhandenen Objekte zu orientieren, auf Geräusche zu reagieren, Sprache zu interpretieren und Gegenstände zu ergreifen, die in Größe, Beschaffenheit und Zerbrechlichkeit unterschiedlich sind. Dagegen ist es für Roboter außerordentlich schwierig, den für Menschen trivialen Unterschied zwischen einer offenen Tür und einem Fenster zu erkennen.

Inzwischen verhelfen Wissenschaftler und Ingenieure ihren Robotern dazu, solche Herausforderungen zu meistern. Dabei nutzen die Forschern die immer preisgünstiger werdende Rechnerleistung. Ein Prozessor mit einer Taktfrequenz von einem Megahertz kostete im Jahr 1970 entsprechend noch fast 6000 Euro – heute sind es nur noch einige Cent. Ähnlich sind auch die Preise für Speichermedien gefallen. Seitdem sie diese billige Rechnerleistung einsetzen, können Entwickler viele der entscheidenden Hürden in Angriff nehmen. So verstehen Spracherkennungssysteme bereits heute Wörter recht gut, aber noch gelingt es kaum, die Maschinen auch den Zusammenhang zwischen diesen Worten erkennen zu lassen.

Eine weitere Barriere für die Entwicklung waren die hohen Kosten für elektronische und mechanische Bauteile wie etwa für Sensoren, mit denen sie die Entfernung zu einem Objekt bestimmen können, oder für Motoren und Servoantriebe, mit deren Hilfe Roboter Gegenstände mit genügend Kraft und Feingefühl anfassen können. Aber auch ▷

Roboter und Heimcomputer

Haushaltsroboter mit Heimcomputern zu vernetzen könnte viele Vorteile bieten. Vom Arbeitsplatz aus könnte ein Angestellter die Sicherheit seines Hauses, die Fütterung seiner Haustiere, das Staubsaugen und die Sorge um seine bettlägerige Mutter im Auge behalten, indem er ein Netzwerk von Haushaltsrobotern auf seinem Bürocomputer überwacht. Die Maschinen könnten über Funk miteinander und mit einem Heim-PC kommunizieren.

Bodenreinigungsroboter
Roboter für die Nahrungs- und Medizinversorgung
Kamera
Rasenmäh-roboter
Heimcomputer
Roboter zum Sortieren, Bügeln und Falten der Wäsche
Überwachungsroboter
DAN FOLEY

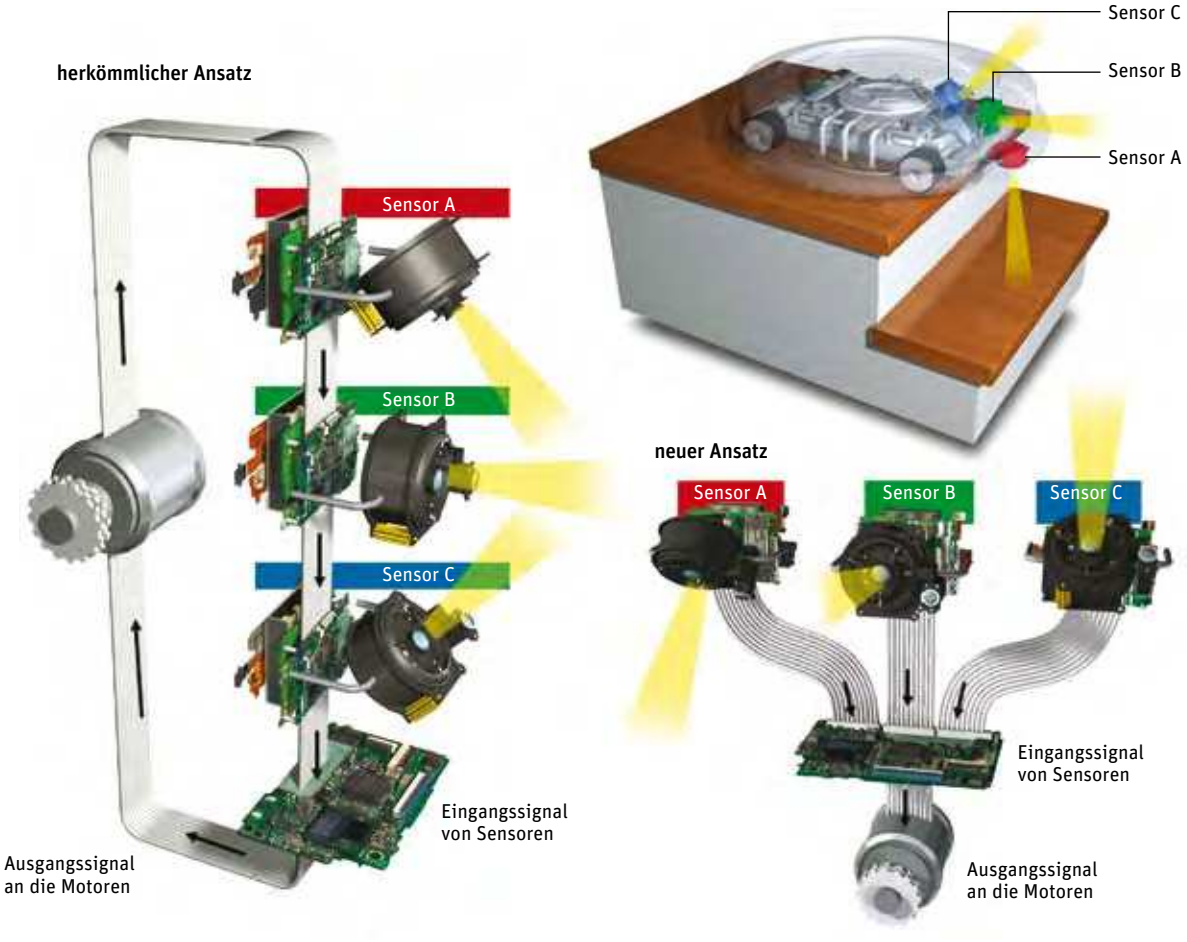
hier fallen die Preise rasant. Ein Laserentfernungsmessgerät, das in der Robotertechnik für exakte Entfernungsmessungen benutzt wird, kostete vor einigen Jahren noch über 12 000 Euro, heute nur noch 2500 Euro. Neue, sogar noch genauere Sensoren, die auf der Radartechnik basieren, sind bereits für weniger erhältlich. Heute können Ingenieure eine Unmenge zusätzlicher Sensoren zu einem vernünftigen Preis beziehen und in Robotern verwenden. Dazu gehören Karten zur Satelliten-Positionsbestimmung mit GPS, dem Global Positioning System, Videokameras und akustische Kameras, die es besser als konventionelle Mikrofone erlauben, eine menschliche Stimme von Hintergrundgeräuschen zu unterscheiden. Damit und dank der besseren Rechner- und Speicherleistung können heutige Roboter in einer Wohnung Staub saugen oder dabei helfen, eine Mine zu entschärfen – Aufgaben, die bis vor Kurzem noch keine kommerziell hergestellte Maschine erledigen konnte.

Vor drei Jahren besuchte ich einige der führenden US-amerikanischen Universitäten, darunter die Carnegie-Mellon-Universität in Pittsburgh, das Massachusetts Institute of Technology, die Harvard-Universität, die Cornell-Universität und die Universität von Illinois. Dort sprach ich über die bedeutende Rolle, die Computer spielen können, um einige der dringendsten Herausforderungen der Gesellschaft zu meistern. Ich wollte den Studenten verdeutlichen, wie aufregend und wichtig Computerwissenschaft sein kann, und sie dazu bewegen, über eine Karriere in diesem Bereich nachzudenken. Nach meinen Vorträgen führten mir die Forscher ihre aktuellen Projekte vor. Fast immer war eines dabei, das sich irgendwie mit Robotertechnik beschäftigte.

Etwa zur gleichen Zeit traten einige Wissenschaftler und Techniker kommerzieller Roboterfirmen an meine Kollegen

Dank Paralleltechnik stolperfrei unterwegs

Mit den Daten zahlreicher Sensoren gleichzeitig umzugehen – etwa den drei Infrarot-Sensoren auf dem Bild unten – ist nicht leicht. Mit konventioneller Technik liest ein Programm erst die Daten aller Sensoren ein, verarbeitet dann die Eingangswerte und sendet Steuerbefehle an die Motoren des Roboters, bevor die Schleife wieder von vorne beginnt. Misst Sensor A (rot) jedoch, dass sich die Maschine an der Kante eines Treppenabsatzes befindet, während das Programm noch alte Sensordaten abarbeitet, stürzt der Roboter ab. Besser ist es, dieses Problem der Parallelität mit einem Programm in den Griff zu bekommen, auf dem die Daten für jeden Sensor unterschiedliche Pfade nehmen können (unten rechts). In dieser Auslegung werden neue Datenwerte sofort bearbeitet: So kann der Roboter auf die Bremse treten, bevor er die Treppe hinunterfällt.



mit der Frage heran, was Microsoft in der Robotertechnik unternimmt. Sie hofften, für ihre eigenen Entwicklungen könne etwas Nützliches dabei sein. Damals hatten wir ihnen nichts zu bieten, beschlossen jedoch, uns dieses Gebiet einmal genauer anzusehen.

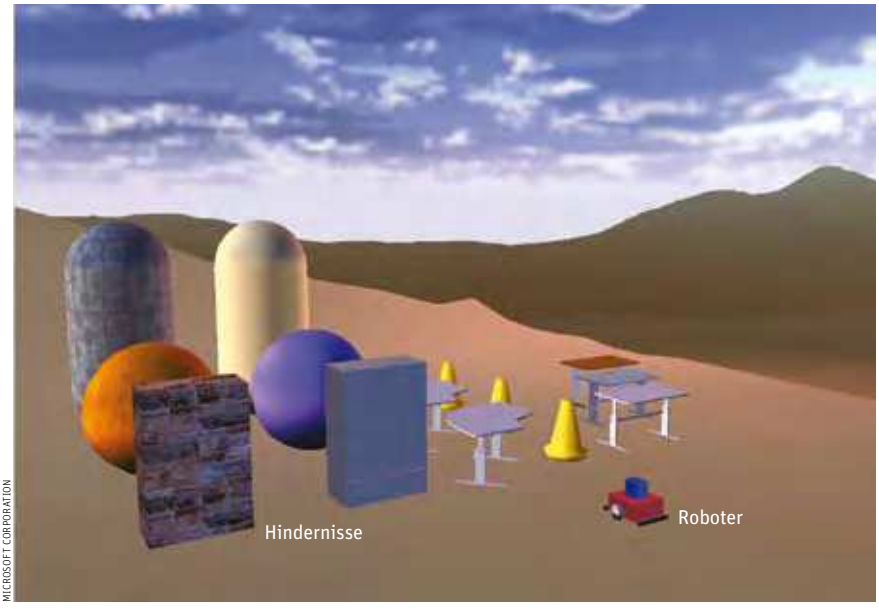
Ich bat Tandy Trower, ein Mitglied meines strategischen Mitarbeiterstabs, an mehreren Orten Roboterforscher zu besuchen und mit ihnen zu reden. In der gesamten Industrie waren die Leute vom Potenzial der Technik begeistert und überall stieß Tandy auf den Wunsch nach Werkzeugen, die Neuentwicklungen erleichtern. In seinem Abschlussbericht schrieb er später, viele der Forscher sähen die Industrie an einem technologischen Wendepunkt hin zur Verbindung von Robotertechnik und Heimcomputer. Nachdem die Hardware bereits leistungsfähig sei, müsse man nun die Software richtig zum Laufen bringen.

Was in den 1970er Jahren fehlte, war eine Programmiersprache, mit der die bereits entwickelte Technologie für kommerzielle Zwecke vielseitig nutzbar würde. Zwar hatten John George Kemeny und Thomas Eugene Kurtz am Dartmouth College bereits 1964 die Programmiersprache Basic erfunden. Mit unserem Produkt Microsoft Basic entwickelten wir jedoch eine komfortablere Version, die auf unterschiedlichen Computersystemen funktionierte und einfach zu bedienen war – das brachte immer mehr Leute zum Programmieren und bald wurde eine »kritische Masse« überschritten. Viele Menschen leisteten wichtige Beiträge zur Entwicklung des PCs, doch ich bin davon überzeugt, dass Microsoft Basic einer der Schlüsselfaktoren der PC-Revolution war.

Plattform für Parallelprogramme

Nachdem ich Tandys Bericht gelesen hatte, wurde mir klar, dass wir nur den zündenden Funken finden müssen, damit die Roboterindustrie einen vergleichbaren Quantensprung vollziehen kann. Ich bat ihn, ein kleines Team zusammenzustellen, das gemeinsam mit den Experten aus der Robotertechnik einige grundlegende Programmierwerkzeuge entwickeln sollte. Jeder, der an Robotern interessiert ist und wenigstens ein Grundverständnis für Programmieren besitzt, sollte leicht Roboteranwendungen schreiben können, die auf unterschiedlicher Hardware funktionieren. Würde es uns gelingen, auf einer maschinenorientierten Ebene eine einheitliche Grundlage für die Roboterentwicklung zu schaffen, die Hard- und Software verbindet, genauso wie es Microsoft Basic für die Computerprogrammierer tat?

Tandys Mannschaft konnte auf einige bereits ausgereifte Technologien zurückgreifen, die eine Gruppe um Craig Mundie, den Forschungs- und Strategie-Chef von Microsoft, entworfen hatte. Sie helfen dabei, eines der schwierigsten Probleme zu lösen, mit denen Roboterentwickler zu kämpfen haben, nämlich das der Parallelität. In einem Robotergehirn laufen jederzeit unzählige Daten al-



MICROSOFT CORPORATION

Eine simulierte Testfahrstrecke für ein mobiles Gerät in einer dreidimensionalen virtuellen Umgebung hilft Roboterentwicklern, ihre Entwürfe zu analysieren und anzupassen, bevor sie in die reale Welt gelangen. Dargestellt ist eine Simulation des Entwicklerpakets Microsoft Robotics Studio. Es berücksichtigt die Wirkung von Kräften wie Gravitation und Reibung auf die Funktion von Robotern.

Ingenieure entwerfen Roboter für viele unterschiedliche Zwecke, doch einen gemeinsamen Standard gibt es dabei nicht. Die Firma iRobot baut das Roboterfahrzeug EOD (links), das im Irak beim Entschärfen von Bomben hilft, sowie den automatischen Staubsauger Roomba (Mitte, kleines Bild), der Holzfußböden und Teppiche reinigt. Das Fahrzeug Stanley (Mitte) gewann im Jahr 2005 das Darpa-Rennen Grand Challenge. Ohne die Hilfe eines menschlichen Fahrers legte es mehr als 225 Kilometer durch die Mojave-Wüste in Kalifornien zurück. Lego Mindstorms (rechts), ein System zum Selbstbau von Robotern, ist das bestverkaufte Produkt in der Geschichte des dänischen Spielwarenherstellers.

IROBOT CORPORATION, 2006

ler Sensoren zusammen; als Reaktion darauf müssen Signale gleichzeitig an die Motoren geschickt werden. Eine konventionelle Lösung dieses Problems wäre, eine einzelne Schleife zu programmieren, die zuerst alle Daten von den Sensoren seriell einliest, dann den Eingang bearbeitet und schließlich Ausgangssignale erzeugt, die das Verhalten des Roboters bestimmen. Danach läuft dieselbe Schleife wieder ab.

Die Nachteile sind offensichtlich. Meldet ein Sensor dem Roboter, er stünde am Treppenabsatz, während das Programm auf Grund der alten Sensordaten errechnete, dass sich die Räder schneller drehen müssen, dann wird der Roboter vermutlich die Treppe hinunterfallen, bevor er die neuen Informationen verarbeitet hat.

Parallelität gibt es heute nicht nur in der Robotertechnik, sondern immer häufiger in Anwendungen für dezentrale Computernetzwerke. Für Programmierer ist es aufwändig, einen Code so zu gestalten, dass Teile davon effektiv auf mehreren Servern gleichzeitig laufen können. Doch zunehmend lösen Computer mit parallel geschalteten Prozessoren Geräte ab, die nur über einen Prozessor verfügen. Neue Software muss das Problem der Parallelität bewältigen.

Gelingen kann dies mit so genannten Multithread-Programmen, welche die Daten auf vielen verschiedenen Wegen laufen lassen. Der Begriff bezieht sich auf das englische Wort *thread* (Faden), das einen Ausführungsstrang bezeichnet. Multithread-Anwendungen zu programmieren ist kompliziert. Craig Mundie und sein Team haben sich für das Problem der Parallelität ein neues Hilfsmittel ausgedacht, das sie CCR *(concurrency and coordination-run-time)* nennen. Dies ist eine Funktionenbibliothek – also eine Sammlung von Programmroutinen, die bestimmte Aufgaben ausführen und das Schreiben von Multithread-Anwendungen vereinfachen, die mehrere gleichzeitig ablaufende Tätigkeiten koordinieren können.

Simulierte Welten im Heimcomputer

Ursprünglich war die CCR dafür gedacht, Programmierern dabei zu helfen, die Vorteile von Systemen mit mehreren Prozessoren zu nutzen. Bald zeigte sich jedoch, dass sie auch für Roboteranwendungen nützlich ist. Stützen sie sich beim Schreiben ihrer Programme auf diese Bibliothek, können Ingenieure zumeist verhindern, dass eine ihrer Entwicklungen gegen eine Wand fährt, weil die Software zu sehr damit beschäftigt ist, Signale an die Motoren zu senden, anstatt die Warnsignale von den Sensoren zu empfangen.

Eine weitere Neuentwicklung von Craigs Team ist der verteilte Software-Dienst DSS *(decentralized software services)*, der es Entwicklern ermöglicht, Anwendungen zu schreiben, bei denen die Serviceteile – also solche Teile des Programms, die etwa einen Sensor auslesen oder einen Motor kontrollieren – unabhängig voneinander ablaufen. Man kann sie genauso gut zusammenstellen, wie man Text, Bilder und Informationen von verschiedenen Servern auf einer Internetseite vereinen kann.

Funktioniert eine Komponente eines Roboters nicht mehr, kann sie dank CCR abgeschaltet oder sogar ersetzt werden, ohne die ganze Maschine neu zu starten. Steht eine drahtlose Breitbandfunkverbindung zur Verfügung, gestattet es dieser Aufbau ohne Weiteres, einen Roboter mit einem Webbrowser von einem anderen Ort zu überwachen und zu steuern. Hinzu kommt, dass eine DSS-Anwendung, die einen Roboter kontrolliert, nicht im Roboter selbst enthalten sein muss, sondern über mehrere Computer verteilt sein kann. Das vereinfacht das Design des Roboters, denn dieser überträgt die komplexen Steueraufgaben an die leistungsfähige Hardware eines Heimcomputers.

Diese Fortschritte eröffnen den Weg zu einer vollkommen neuen Klasse von Robotern: beweglichen, drahtlosen Peripheriegeräten, die dank der Rechenleistung von Computern optische Erkennungsaufgaben und Navigationsprobleme meistern können. Und da wir diese Geräte zu einem Netzwerk verbinden können, wird es wohl bald Gruppen von Ro-

STAUBSAUGER ROOMBA: IROBOT CORPORATION; AUTO STANLEY: CORBIS / L.A. DAILY NEWS; GENE BLEVINS; RECHTS (MINDSTORMS NXT): LEGO GROUP

botern geben, die zusammen den Meeresboden vermessen oder Getreide säen.

An derartige Anwendungen dachten die Entwickler von Microsoft Robotics Studio, einem neuen Werkzeugkasten für Softwareentwickler, den Tandys Team Ende letzten Jahres auf den Markt brachte. Zu diesem Paket gehören Hilfsprogramme, mit denen man Roboteranwendungen in verschiedenen Programmiersprachen schreiben kann, sowie ein Simulationswerkzeug, das es Ingenieuren ermöglicht, ihre Maschinen in einer virtuellen dreidimensionalen Umgebung zu testen, bevor die Roboter in der realen Welt Einzug halten. Wir wollten mit diesem Paket eine erschwingliche, offene Plattform schaffen, die es Roboterentwicklern erlaubt, von vornherein Hard- und Software in ihren Entwurf zu integrieren.

Wie lange wird es wohl noch dauern, bis Roboter zu unserem Alltag gehören? Der Internationalen Föderation für Robotertechnik zufolge gab es 2004 weltweit etwa zwei Millionen Roboter in Privathaushalten. Bis zum Jahr 2008 werden weitere sieben Millionen hinzukommen. Das Informations- und Kommunikationsministerium Südkoreas schätzt, dass bis 2013 in jedem Haushalt des Landes ein Roboter arbeiten wird. Die japanische Roboterindustrie sagt voraus, dass der Börsenwert der Industrie für Haushaltsroboter bis 2025 weltweit mehr als 60 Milliarden Euro betragen wird – das Zehnfache des heutigen Betrags.

Genau wie im Fall der Computerindustrie in den 1970er Jahren ist es unmöglich, genau vorherzusagen, welche Anwendungen diese neue Industrie antreiben werden. Als entscheidend könnten sich Roboter erweisen, die älteren Menschen dienen oder ihnen gar Gesellschaft leisten. Vielleicht unterstützen Roboter Menschen mit Behinderungen und helfen Soldaten, Bauarbeitern und medizinischen Fachleuten. Roboter werden gefährliche Industrieanlagen warten, mit giftigen Stoffen hantieren und abgelegene Ölpipelines kontrollieren. Sie werden es Ärzten ermöglichen, Patienten zu untersuchen und zu behandeln, obwohl diese womöglich Tausende von Kilometern entfernt sind, und sie werden eine bedeutende Rolle in der Verkehrssicherheit sowie bei Such- und Rettungsoperationen spielen.

Vielleicht werden einige der Geräte so menschenähnlich aussehen wie C-3PO in den Krieg-der-Sterne-Filmen, aber wohl nur die wenigsten. Es wird immer mehr bewegliche Peripheriegeräte geben, doch kaum jemand wird noch sagen können, was genau ein Roboter ist – zu unterschiedlich werden sie aussehen und funktionieren. Spezialisierte Roboter werden allgegenwärtig sein, aber nur wenige werden den zweibeinigen Humanoiden der Sciencefiction ähneln. Sobald diese Geräte für den Verbraucher erschwinglich sind, können sie die Art und Weise, in der wir arbeiten, kommunizieren, lernen und uns unterhalten lassen, so gründlich verändern, wie es die Computer in den vergangenen drei Jahrzehnten taten. ◁

William H. (»Bill«) Gates III. ist Mitbegründer und Vorsitzender von Microsoft, der größten Softwarefirma der Welt. Während Gates an der Harvard-Universität studierte, entwickelte er 1970 eine Version der Programmiersprache Basic für den ersten Mikrocomputer, den MITS Altair. Gates brach sein Studium ab, um seine Energie ganz in Microsoft zu stecken, die Firma, die er seit 1975 mit seinem Freund Paul Allen betreibt. Im Jahr 2000 gründeten Gates und seine Frau die Bill und Melinda Gates Stiftung.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Robotik. Von Alois Knoll und Thomas Christaller. Fischer Taschenbuch Verlag 2003

Parallel robots. Von J.-P. Merlet. Springer-Verlag 2006

Principles of robot motion. Von Howie Choset, Seth Hutchinson und George Kantor. MIT Press 2005

Introduction to autonomous mobile robots. Von Roland Siegwart und Illah Nourbakhsh. B&T 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/864268.

PAPIERRECYCLING

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Alt und neu im Faserbrei

Die Wiederverwertung von Altpapier ist längst Routine, erfordert aber Raffinesse im Detail.

Von Klaus-Dieter Linsmeier und Mark Fischetti

Waldbesitzern mag es ein Dorn im Auge sein, die Bäume wird es freuen: Weltweit wird inzwischen mehr als die Hälfte des Papiermülls wieder verwendet. Nur noch etwa fünfzig Prozent des Rohstoffs bei der Papierherstellung wird direkt aus Holz gewonnen. Dennoch wird die Wald- und Forstwirtschaft ihren wichtigsten Abnehmer niemals verlieren, denn nach fünf bis sechs Recyclingdurchgängen taugt der Beschreib- und Verpackungsstoff nur noch zum Verfeuern. Allerdings spielt dieser Effekt in der Praxis noch keine Rolle, da in jedem Aufbereitungszyklus auch Material verarbeitet wird, das sozusagen zum ersten Mal dabei ist.

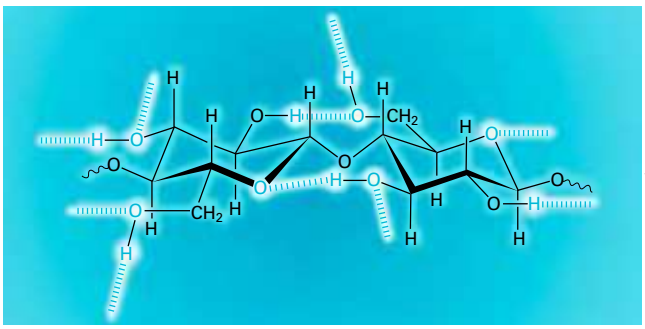
Papier besteht aus miteinander vernetzten Zellulosefasern. Zellulose ist ein Polymer aus Zuckerbausteinen. Weil diese Ketten reichlich Hydroxyl-(OH)-Gruppen tragen, verbinden sie sich durch Wasserstoffbrücken (siehe Grafik unten) zu Bündeln und auf gleiche Weise bauen sich wiederum größere Strukturen der Faser auf. Bei der Papierherstellung erzeugt man einen Brei aus solchen Fasern, der in den weiteren Prozessschritten entwässert und auf einem Sieb getrocknet wird. Wo sich in den entstehenden Papierbögen Fasern kreuzen, bilden sich dann ebenfalls Wasserstoffbrücken – es entsteht ein dichtes Geflecht. Dabei wirkt das Wasser als »Ehevermittler«: Weil sein Volumen beim Trocknen schwindet, drängt das Wasser durch seine Oberflächenspannung die Partner immer näher zusammen, bis schließlich bei einem Abstand von 0,3 Nanometern (millionstel Millimeter) eine Wasserstoffbrücke möglich ist. Je mehr dieser Brücken sich ausbilden, desto fester ist später das Papier.

Der Trick bei der Wiederaufbereitung ist, dass zerkleinertes Altpapier in Wasser suspendiert wird, sodass sich Wassermoleküle zwischen die OH-Gruppen der Faserverbindungen drängen und die Wasserstoffbrücken auflösen können. Und hier liegt das erwähnte Problem. Denn bei der Papiertrocknung entwickeln sich auch Bindungen innerhalb der Fasern, sie werden mit jeder Wiederverwendung steifer, Experten sprechen vom Verhornen. Dadurch kommen weniger Hydroxylgruppen einander nahe genug, um in den Kreuzungspunkten Verbindungen auszubilden. Zudem wird die Faser mit jedem Recyclingzyklus kürzer und damit schrumpft auch ihre Kontaktfläche. Gegen diesen Längenverlust ist kein Kraut gewachsen, gegen das Verhornen hilft ein Mahlvorgang. Dabei wird die Faser gequetscht und »aufgeraut«, dadurch wächst die für Bindungen zur Verfügung stehende Oberfläche. Ob dieser Schritt erforderlich ist, hängt von der Qualität des zur Verfügung stehenden Rohstoffs ab.

Papier ist ein recht komplexer Stoff, der zahlreiche Zusätze enthält. Dazu gehören Nassfestmittel, die wasserunlösliche Querverbindungen zwischen den Fasern ausbilden und so verhindern, dass das feuchte Papier aufquillt. Bekannte Anwendungen sind Landkarten, Geldscheine, aber auch »niesfeste« Taschentücher und Küchenkrepp. Um solches Papier wiederaufzubereiten, müssen die Verbindungen chemisch aufgebrochen werden, doch dabei leidet auch die Faser. Dergleichen lohnt nur, wenn das Altpapiergebinde ausschließlich aus solchem Material besteht. Ein Beispiel für solche »Monoware« sind Flaschenetiketten.

Problematischer als Faseralterung und Nassfestmittel sind die diversen Fremdstoffe, die bei Herstellung, Veredelung und Gebrauch das Papier »kontaminieren«. Dazu gehören im Printbereich die Farben, bei Hochglanzdruckprodukten wie dem Umschlag dieses Hefts zudem die Lackierungen. Soll das Recyclingpapier nicht als Verpackungsmaterial dienen, sondern wieder als Beschreib- oder Bedruckstoff zum Einsatz kommen, muss dergleichen entfernt werden. Spezielle Chemikalien sorgen bei der Aufbereitung dafür, dass sich beispielsweise winzige Druckfarbenpigmente zu größeren Partikeln zusammenlagern, die dann an Luftblasen haften; als Schaum lassen sie sich aus der Faserstoffsuspension abtrennen. Ein weiteres Problem sind Klebstoffe etwa von Briefetiketten oder der Klebebindung eines Magazins. Sie können sich auf Maschinenteilen ablagern und den Wiederaufbereitungsprozess stören. Feine Siebe sollen Klebstoffe aus der Fasersuspension entfernen, doch das gelingt nicht immer.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft, **Mark Fischetti** bei Scientific American. Weblinks zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864315.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

Zellulose besteht aus Ketten von Zuckermolekülen, die sich über Wasserstoffbrücken miteinander vernetzen: Da das Sauerstoffatom in Hydroxylgruppen leicht elektrisch negativ, das Wasserstoffatom leicht positiv ist, können beide mit entsprechend entgegengesetzt geladenen Atomen des Moleküls durch elektrostatische Anziehung eine Bindung eingehen.

Wussten Sie schon?

▶ Der **Göttinger Professor Justus Claproth** (1728 – 1805) gilt als Erfinder des Papierrecyclings. Gemeinsam mit dem Papiermacher Johann Engelhard Schmid (1736 – 1811) entwickelte er ein Verfahren, mittels Terpentinöl und Wascherde die Druckerschwärze aus Altpapier zu entfernen, um daraus neues Schreibpapier herzustellen. Das 1774 publizierte Verfahren konnte sich aber nicht durchsetzen.

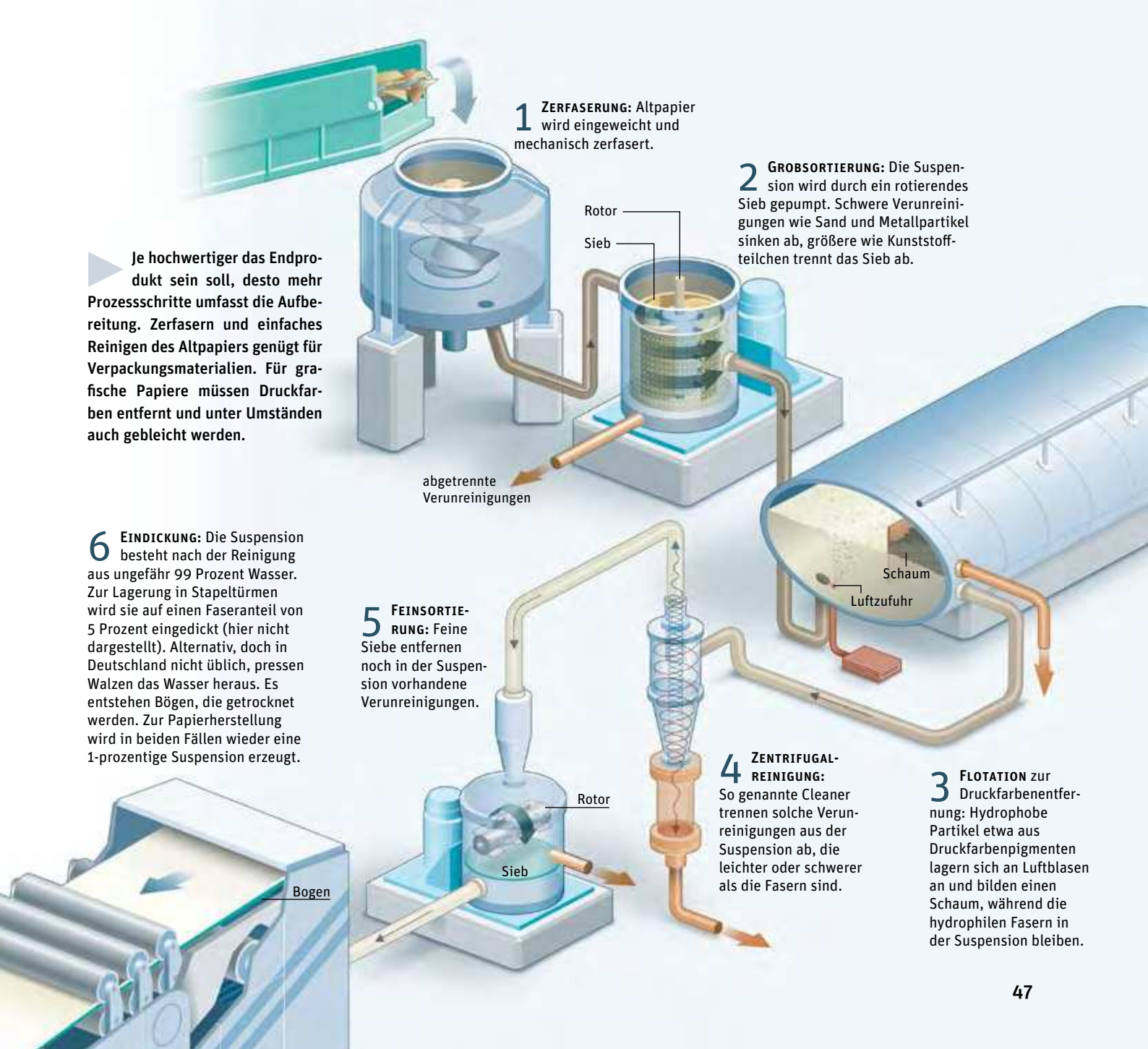
▶ **Deutschland ist der fünftgrößte Papiererzeuger** der Welt. Im Jahr 2005 betrug die Gesamtproduktion 21,7 Millionen Tonnen, der Verbrauch belief sich hier zu Lande auf 19,2 Millionen Tonnen. Davon wurden 15,123 Millionen Tonnen als Altpapier gesammelt, das entspricht einer Rücklaufquote von 79 Prozent. Die deutsche Papierindustrie setzte 14,413 Millionen Tonnen wieder ein, der Rest wurde exportiert.

▶ Die **automatische Sortierung des Altpapiers** nach hellen und dunklen Qualitäten ist nicht der Weisheit letzter Schluss in Sachen Automation. Im Nah-Infrarotbereich, das heißt bei Wellenlängen von 1 bis 2,5 Mikrometer beleuchtet, lassen sich auch Verunreinigungen wie Kunststoffe, Holz und Textilien im Altpapier erkennen und entfernen.

▶ Am **12. Dezember 2001 gab das Europäische Komitee** für Normierung die »European List of Standard Grades of Recovered Paper and Board« heraus. Diese Norm mit der Nummer 643 unterscheidet fünfzig Sorten von Papier und Karton, die in sechs Hauptgruppen eingeteilt werden wie Gruppe 1 »Weißes Papier« für alle Büro- und Schreibpapiere oder Gruppe 2 »Glanzbeschichtete Haushaltsverpackungen« für bunt bedruckte Kartonagen. Diese Liste bildet europaweit die Grundlage des Altpapierhandels.

INFOGRAFIK: SAMUEL VELASCO

Je hochwertiger das Endprodukt sein soll, desto mehr Prozessschritte umfasst die Aufbereitung. Zerfasern und einfaches Reinigen des Altpapiers genügt für Verpackungsmaterialien. Für grafische Papiere müssen Druckfarben entfernt und unter Umständen auch gebleicht werden.



Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

FOTO: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: IEN CHRISTIANSEN

Spiegel im Gehirn

Die Entdecker der Spiegelneuronen schildern, wie sie diese bemerkenswerten Hirnzellen aufspürten. Sie geben zudem einen Überblick über die neuere Forschung zu dem Phänomen, die Regungen anderer intuitiv zu verstehen.

Von Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi und Vittorio Gallese

Peter sieht, wie Anna nach einer Blume greift. Er weiß sofort, dass sie die Blume pflücken möchte – und mehr. Denn sie lächelt ihm zu. Er merkt: Sie möchte ihm die Blüte schenken. Wie kann es sein, dass Peter Annas Absicht fast unmittelbar erahnt, kaum dass die kurze Handlung begonnen hat?

Vor zehn Jahren hätten die meisten Neurowissenschaftler und Psychologen dahinter einen blitzschnellen Denkprozess vermutet, wenn jemand gleich erfasst, was der andere tut – ja was er zu tun im Begriff ist. Sie stellten sich dieses Verstehen und Im-Voraus-Begreifen von Handlungen anderer so ähnlich wie beim logischen Schlussfolgern vor: Ein komplizierter Kognitionsapparat bearbeitet die eintreffende Sinnesinformation und vergleicht sie mit früheren Erfahrungen ähnlicher Art. Von daher wisse Peter, so hieß es, was Anna vorhat und bezweckt.

Manchmal mag das zutreffen. Besonders wenn das Verhalten einer Person nicht leicht zu deuten ist, muss wohl scharfes Denken einspringen. Doch oft verstehen wir eine Situation ganz leicht und schnell. Sollte da nicht eine andere Ebene eingeschaltet sein?

Heute wissen wir: Ja, es gibt dafür im Gehirn einen direkteren Weg. Zufällig stießen wir darauf, als wir in den frühen 1990er Jahren an Affen Hirnmechanismen ergründeten. Neben uns dreien gehörte damals zu unserem Forscherteam an der Universität Parma (Italien) noch Luciano Fadiga.

Bei Schweinsaffen, einer Makakenart, untersuchten wir das Verhalten einer Klasse von Nervenzellen in der Hirnrinde – dem Cortex –, die »feuern« (Signale versenden), wenn das Tier mit der Hand eine einfache, zielorientierte Bewegung durchführt, etwa nach einer Frucht greift.

Diese Zellen liegen in einem Gebiet, wo das Gehirn Bewegungen vorbereitet. Zu unserer großen Verblüffung feuerten dieselben Neuronen des Affen auch dann, wenn einer der Experimentatoren eine Rosine nahm und der Affe einfach nur zusah.

Um eine vorgeführte Bewegung nachzuahmen, müssen wir nicht erst nachdenken. Das Gehirn versteht sich darauf intuitiv.

Gesehenes verinnerlichen

Es wirkte, als würden diese Zellen den beobachteten Verhaltensakt direkt, unmittelbar widerspiegeln. Deswegen nannten wir sie »Spiegelneuronen« oder »Spiegelzellen«.

Ähnlich wie es im Gehirn offenbar Neuronenschaltkreise für spezifische Gedächtnisinhalte gibt, scheint es, als würden Spiegelneuronen in Verbänden agieren, in denen Muster für bestimmte Ver- ▷

haltensabläufe kodiert sind. Doch das Besondere daran: Dank solcher Schablonen können wir vermutlich einfache, grundlegende Bewegungen ohne nachzudenken ausführen. Sie sind wohl auch beteiligt, wenn wir das Verhalten eines anderen intuitiv verstehen. Als sich Anna nach der Blume bückt, läuft diese Handlung gleichzeitig auch in Peters Gehirn ab, während er seiner Freundin zusieht.

Interessanterweise postulierten einst schon Phänomenologen, dass man etwas in sich selbst erleben muss, um es wahrhaft zu verstehen. Hierfür im Spiegelneuronensystem eine physische Grundlage gefunden zu haben, ist zumindest für Hirnforscher eine einschneidende Entdeckung, die die Wissenschaft des Verstehens völlig verändert.

Um etwas wahrhaft zu verstehen, muss man es in sich selbst erleben. Spiegelneuronen könnten dafür das neuronale Substrat darstellen

Als wir auf die Spiegelneuronen stießen, hatten wir allerdings nicht vor, philosophische Theorien zu stützen oder zu widerlegen. Wir wollten schlicht aufklären, welche Aktivitätsmuster von Nervenzellen dabei mitwirken, Hirnkommandos für bestimmte Bewegungen zu erzeugen. Dazu registrierten wir das Verhalten einzelner Zellen in der so genannten Area F5 von Affen (siehe Kasten rechts, oben), ein Areal, das für die Organisation von Hand- und Mundbewegungen wichtig ist. Bei unseren Studien boten wir den Versuchstieren alle möglichen Objekte, vor allem Lieblingsfutter und Spielzeug. Erwartungsgemäß feuerten bei den verschiedenen Bewegungsaufgaben im Affengehirn jeweils andere Gruppen von Neuronen.

Wie schon angedeutet, fiel uns nach einiger Zeit etwas Befremdliches auf: Nahm einer von uns ein Stück Obst, dann registrierten wir auf dem Monitor die gleichen Nervenzellsignale vom Affenhirn wie vorher, wenn das Tier selbst tätig war (Kasten rechts, oben). Natürlich dachten wir zuerst an eine banale Fehlerquelle. Vielleicht hatten wir ja nicht bemerkt, dass der Makake gerade selbst eine kleine Handbewegung machte. Also entwarfen wir Versuche, die diesen Faktor ebenso wie andere ungewollte Einflüsse ausschlossen, etwa Futtererwartung. Doch alle Vorsicht nützte nichts. Schließlich blieb nur die eine Erklärung: Es musste sich um eine echte Repräsentation der gesehenen Bewegung im Gehirn handeln, obgleich der Affe sie gar nicht selbst ausführte.

Vielfach kann man bei biologischen Fragestellungen das Objekt, dessen Funktion man ergründen möchte – ob Gen, Protein oder Zellgruppe –, ausschalten oder zerstören und die Auswirkungen beobachten. Bei den Spiegelneuronen konnten wir so nicht vorgehen. Wir fanden diese Zellen zu weit verteilt in wichtigen Regionen beider Hirnhälften, unter anderem in motorischen und prämotorischen Arealen und im Scheitellappen. Hätten wir das Spiegelzellsystem komplett ausgeschaltet, wären zugleich dermaßen viele kognitive Funktionen mit verloren gegangen, dass wir letztlich über diese Neuronen nichts Spezielles mehr hätten herausfinden können.

Wir mussten uns also andere Versuche ausdenken. Uns interessierte, ob die Spiegelzellen mehr können, als nur eine gesehene Bewegung einfach zur Kenntnis zu nehmen – ob sie nämlich eigentlich die Aufgabe haben, einen Vorgang auch zu verstehen. Dazu konstruierten wir zwei Versuchsreihen.

In der ersten Serie prüften wir, ob Begleitgeräusche einer Handlung genügen, um die F5-Spiegelneuronen zu aktivieren. Zuerst schauten (und hörten) die Affen zu, wie wir geräuschvoll Papier zerrissen oder Erdnüsse knackten. Anschließend ließen wir sie nur die Begleitgeräusche hören. Und tatsächlich: Viele der F5-Spiegelzellen, die beim Zusehen gefeuert hatten, reagierten nun auch beim reinen Geräusch. Diese Zellfraktion nannten wir »audiovisuelle Spiegelneuronen«.

Die zweite Versuchsreihe galt der Beteiligung von Spiegelneuronen an reiner Vorstellung. Würden die Zellen Signale senden, auch wenn der entscheidende Teil der Handlung unsichtbar blieb – wenn das Tier nur den Anfang davon wahrnahm, doch immerhin so viel davon sah, dass es sich den Schluss denken konnte?

Erster Test auf Verstehen

Diesmal sahen die Affen zuerst einem von uns zu, wie er die Hand nach einem Leckerbissen ausstreckte, den er dann ergriff. Anschließend stellten wir vor das Tier einen Sichtschirm, der den zweiten Teil der Handlung verdeckte. Der Affe sah jetzt nur, wie sich die Hand ausstreckte und hinter dem Schirm verschwand. Trotzdem feuerte von den zuvor aktivierten F5-Spiegelneuronen die Hälfte. Tatsächlich geschah das nur dann, wenn der Makake wusste, dass hinter der Sichtblende etwas Gutes versteckt war. Zeigte man ihm vorher einen leeren Tisch und stellte dann den Schirm davor, reagierten die Zellen auf die Handbewegung nicht (siehe Kasten rechts, links unten). Unsere These schien bestätigt: Spiegelneuronen dienen wohl eher dem Begreifen von Verhalten.

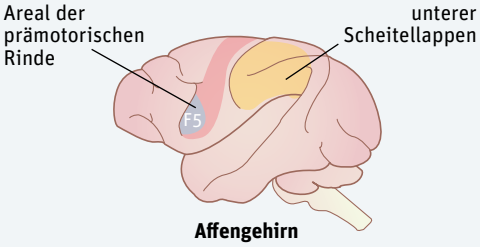
Die Frage war nun: Verfügt auch der Mensch über ein solches Neuronensystem? Tatsächlich scheint dem so zu sein.

In Kürze

- **Mensch und Affen** aktivieren manche **Hirnneuronen** sowohl bei eigenen Bewegungen als auch dann, wenn sie die gleiche Bewegung bei jemand anderem sehen. Vergleichbares scheint bei manchen Gefühlen stattzufinden.
- Dank solcher **Spiegelneuronen** (Spiegelzellen) können wir **Handlungen**, **Absichten** und sogar **Gefühle** anderer direkt selbst innerlich erleben und dadurch unmittelbar verstehen.
- Vermutlich sind die Spiegelneuronen auch für unser Talent des **Nachahmens** und des **Lernens durch Abschauen** wichtig. Der Spiegelmechanismus verbindet Gehirne. Somit erlaubt er neue, zusätzliche Formen der Verständigung.

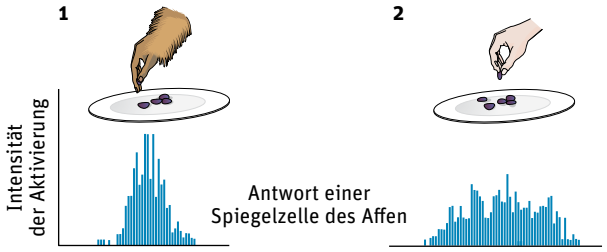
Was Spiegelneuronen können

Die Autoren entdeckten das Phänomen, als sie Hirnaktivitäten von Affen aufzeichneten, die Muskelbewegungen generieren. Dieselben Hirnneuronen feuerten auch, wenn jemand anderes die gleiche Bewegung ausführte. Diese Repräsentation umfasst sogar die Intention einer beobachteten Handlung, Vielleicht ist unter anderem dies der eigentliche Sinn von Spiegelzellen, das Verhalten anderer fast automatisch zu verstehen und vorherzusehen.



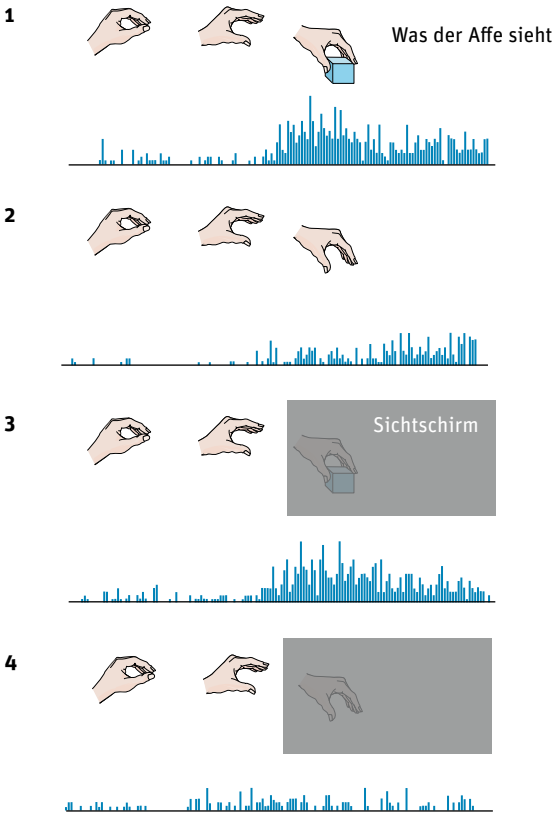
Eine Handlung verstehen

Nimmt der Affe eine Rosine, so feuern Zellen im prämotorischen Areal F5 (1; gezeigt ist die Aktivität einer einzelnen Zelle). Dieselbe Zelle war ebenfalls hochaktiv, wenn der Experimentator das Gleiche tat und der Affe zuschaute (2).



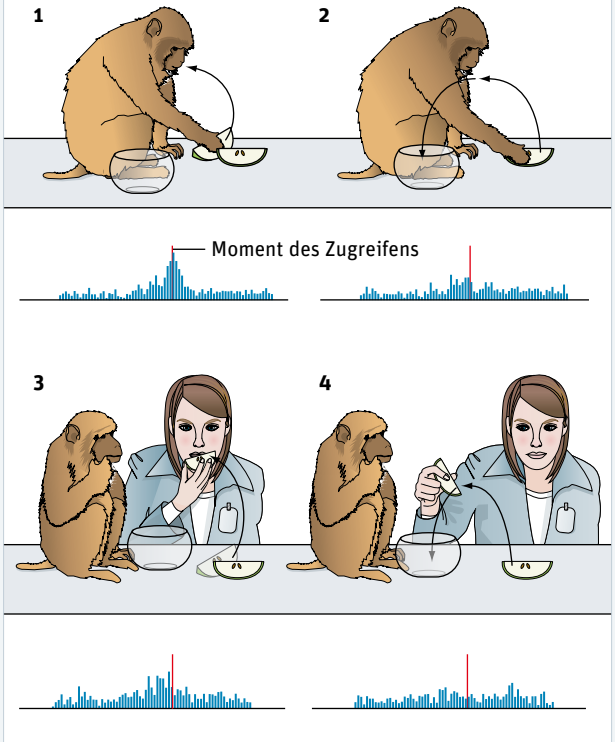
Das Handlungsziel erkennen

Ein F5-Spiegelneuron feuert intensiv, wenn der Affe zusieht, wie eine Hand ein Objekt ergreift (1). Geht der Griff ins Leere, reagiert die Zelle schwach (2). Derselbe Unterschied zeigt sich, wenn der Affe den Schluss der Handlung nicht sieht, aber weiß, ob hinter einem Schirm das Objekt liegt oder nicht (3 und 4).



Die Absicht erkennen

Das hier erfasste Neuron im unteren Scheitellappen feuert in dem Augenblick intensiv (roter Strich), in dem der Affe Futter nimmt, das er gleich fressen wird (1). Legt das Tier den Brocken dagegen in eine Schale, ist die Zelle im Moment des Zugreifens nicht so aktiv (2). Das Gleiche geschieht, wenn jemand anderes die gleichen Aktionen vor den Augen des Affen ausführt (3 und 4). Anscheinend bezeichnet die schon beim Zugreifen auftretende Nervenzellaktivität, dass die Absicht der Handlung erkannt ist.



LUCY READING-IKKANDA

▷ Die ersten deutlichen Hinweise darauf lieferten bereits Studien an freiwilligen Teilnehmern, wobei wir mit verschiedenen indirekten Messungen auf die Aktivität in der motorischen Hirnrinde schlossen. Zum Beispiel registrierten wir eine Aktivierung von Nerven für die Hand- und Armmuskulatur, wenn die Teilnehmer zusahen, wie ein Experimentator Objekte ergriff oder aber nur bedeutungslose Bewegungen ausführte. Ähnlich wiesen später auch Aufzeichnungen der Hirnrindenaktivität, etwa mittels Elektroenzephalografie (EEG), darauf hin, dass Menschen wahrscheinlich Spiegelneuronen besitzen. Allerdings zeigten diese Methoden nicht genau, wo im Gehirn solche Aktivierungen auftreten. Dazu mussten wir die modernen bildgebenden Verfahren anwenden, die aktivierte Hirngebiete abbilden.

In der San-Raffaele-Klinik in Mailand (Italien) konnten wir Aufnahmen mittels Positronen-Emissions-Tomografie (PET) machen. Die Versuchspersonen beobachteten verschiedene Greifbewegungen und dann zur Kontrolle unbewegte Objekte. Beim Sehen von Greifbewegungen sprachen hauptsächlich drei Hirnrindengebiete an. Von einem Bezirk, der oberen Schläfenfurche, war schon bekannt, dass dortige Zellen beim Betrachten sich bewegender Körperteile reagieren.

Bedeutungsvolles Lächeln

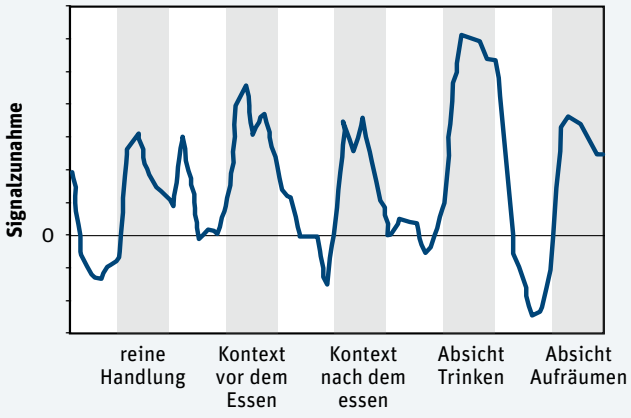
Aber die beiden anderen Regionen korrespondieren mit Hirngebieten der Affen, wo wir Spiegelneuronen entdeckt hatten. Es handelt sich um den unteren Scheitellappen und die untere Stirnwindung. Letztere entspricht jenem Bezirk der prämotorischen Rinde bei Affen, in dem auch die Area F5 liegt.

Diese Befunde warfen weitere Fragen auf. Vor allem wollten wir jetzt die Rolle und Gewichtung des Spiegelmechanismus genauer erforschen. Inwieweit beteiligen sich Spiegelzellen am Begreifen von Handlungen? Wenn sie denn erlauben, eine Handlung quasi durch direkte innere Erfahrung unmittelbar zu verstehen – wie wichtig ist dazu das Ziel der Handlung?

Nochmals zu Peter und Anna: Peter merkt nicht nur, dass Anna die Blume pflücken will, sondern auch, dass sie diese für ihn pflückt. Das sagt ihm ihr bedeutungsvolles Lächeln. Die Handlung, die er voraussieht, ist erst mit dem Überreichen der Blüte abgeschlossen. Das weiß Peter von Anfang an.

Genauer betrachtet ist eine Bewegungsabfolge von ihrem Ziel bestimmt, von ihrer Intention. Es ist etwas anderes, ob ich beabsichtige, an der Blüte zu riechen, oder ob ich die Blume pflücke, um sie jemandem zu überreichen. Würden sich die Spiegelneuronen jeweils anders

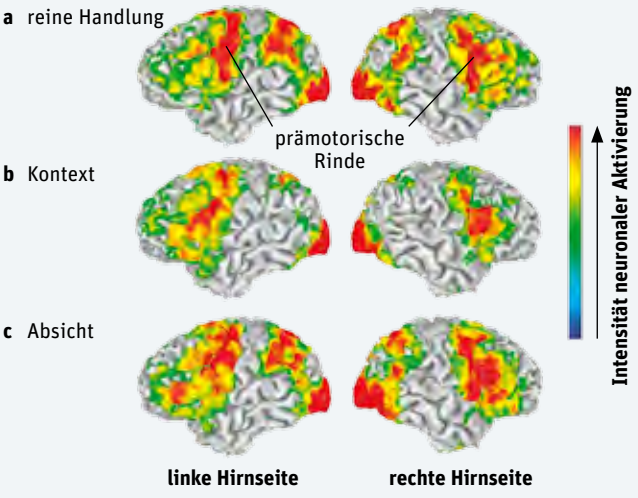
Wie sich die Absicht im Beobachter spiegelt



Versuchspersonen sahen auf Video:

a zwei verschiedene Szenen, in denen eine Hand eine Tasse ergreift (Handlung ohne Kontext);
b eine frisch servierte Mahlzeit und dieselben Utensilien nach dem Essen (Kontext ohne Handlung);
c die vorangegangenen Szenen kombiniert (Handlung mit Kontext).

Die beiden kombinierten Szenen konnten bedeuten, dass jemand aus der Tasse trinken beziehungsweise dass er die benutzte Tasse abräumen wollte. Spiegelneuronenpopulationen der prämotorischen Rinde beider Hirnhälften reagierten bei den Szenen mit Handlungsabsicht am stärksten. Sie unterschieden aber klar zwischen der Absicht zu trinken – eine biologische Grundfunktion – und der abzuräumen – ein kulturell erworbenes Verhalten. Auf das biologisch grundlegende Verhalten sprachen sie viel stärker an.



FOTOS UND HIRNSCANS AUS: MARCO IACOBONI ET AL.: „GRASPING THE INTENTIONS OF OTHERS“, PLOS BIOLOGY 2005, BD. 3, NR. 3; DIAGRAMM: LUCY READING-IKKANDA

verhalten – obwohl sich große Teile beider Verhaltensabläufe gleichen? Um das zu überprüfen, untersuchten wir zunächst wiederum an Makaken zwei weit gehend gleiche Bewegungsfolgen mit verschiedenen Zielen (siehe Kasten S. 51, rechts unten). Und zwar zeichneten wir währenddessen die Aktivierung von Zellen im Scheitellappen auf.

Im ersten Teil dieser Versuche durfte der Affe entweder eine Frucht mit der Hand nehmen und sie dann fressen. Oder er sollte die Frucht nehmen, musste sie aber in eine Schüssel legen. Tatsächlich: Schon im Augenblick des Greifens verhielten sich die meisten der beobachteten Nervenzellen bei beiden Aufgaben unterschiedlich. Offensichtlich existieren für spezifische Handlungsabsichten des Ausführenden jeweils eigene neuronale Verschaltungsketten oder Netze.

Der zweite Versuchsteil sollte erweisen, ob sich auch das Spiegelsystem an solche Kriterien hält – ob es dieselbe Unterscheidung trifft. Davon versprachen wir uns Aufschluss darüber, wie wir Intentionen anderer verstehen. Diesmal sahen die Affen zu, wie ein Experimentator eine Frucht entweder nahm und in den Mund steckte oder wie er sie nahm und in eine Schale legte. Und wirklich sprachen im Affenhirn jeweils dieselben Nervenzellen – im Augenblick des Greifens – im selben Muster an wie vorher, als das Tier selbst agierte. Auch reagierten die meisten Spiegelneuronen wieder am intensivsten, wenn der Experimentator den Bissen in den Mund stecken würde.

Offenbar sind die beiden Phänomene neuronal eng gekoppelt: zum einen die motorische Organisation für intendierte Handlungen, zum anderen das Erfassen der Handlungsziele anderer. Es genügte den Affen, den Anfang einer Bewegungsfolge im Bedeutungszusammenhang zu sehen – etwa das Zugreifen. Das aktivierte sogleich jene Kette von Spiegelneuronen, die diese spezielle Handlungsabsicht kodieren. Welche neuronale Kette jeweils in Aktion trat, hing von vielem ab: außer vom Kontext auch von der Art des ergriffenen Objekts oder von der Erinnerung an vorangegangenes Verhalten des Experimentators.

Wirkt ein ähnlicher Mechanismus beim Menschen, wenn wir Intentionen erkennen? Um das herauszufinden, arbeiteten wir mit Marco Iacoboni und seinen Kollegen von der Universität von Kalifornien in Los Angeles zusammen. Mit funktionaler Kernspintomografie (fMRI) zeichneten wir Gehirnaktivitäten freiwilliger Probanden auf. Wir zeigten den Versuchspersonen kurze Videofilme, die drei verschiedene Szenen jeweils in zwei Varianten enthielten (siehe Kasten links).

Zuerst sahen die Teilnehmer nur eine Hand, die eine Tasse ergreift – und zwar auf zwei verschiedene Weisen. Als Zweites sahen sie das Zubehör einer kleinen Mahlzeit auf einem Tisch, wobei die Tassen wie in den ersten Szenen standen: Im einen Fall sah es aus wie eben aufgetragen und noch unberührt, im anderen wie nach dem Imbiss. Die dritte Szenensorte zeigte, wie eine Hand in diesen beiden Arrangements nach der Tasse greift: im einen Fall, als wolle jemand aus der Tasse trinken, im anderen, als wolle er die Tasse abräumen.

Die Reaktion auf diese Szenen war wie erhofft (Kasten links): Spiegelneuronen der Teilnehmer agierten bei all diesen Filmsequenzen, und sie unterschieden zwischen den Szenen. Eindrucksvoll war, dass besonders die dritte Szenensorte, die Intentionen assoziieren sollte, das Spiegelsystem stark aktivierte. Zudem löste das Handlungsziel Trinken deutlich mehr Erregung aus als die implizierte Absicht, den Tisch abzuräumen.

Man kann sich gut vorstellen, dass das Phänomen Spiegelneuronen sozialen Arten nützt, wie Affen und der Mensch sie darstellen. Elementare Verhaltensäußerungen werden so quasi in ein umfassendes, in der Motorik verankertes Bedeutungsnetzwerk eingebunden. Andere Individuen verstehen das Verhalten intuitiv – direkt und sofort –, ohne eine komplexe kognitive Maschinerie anstrengen zu müssen.

Doch was ist mit den Gefühlen anderer? Die Empfindungen von Freund und Feind blitzschnell zu erfassen, ist im sozialen Feld zweifellos häufig ebenso wichtig wie Verhaltensakte zu verstehen. Wie oft vermittelt bereits der Gefühlsausdruck die Absicht! Schaltet sich auch dabei das Spiegelzellsystem ein? Diese spannende Frage haben wir wie auch verschiedene andere Forschergruppen untersucht.

Menschen erfassen beobachtetes Verhalten wahrscheinlich nicht eingleisig, sondern sie können das Gesehene sowohl kognitiv als auch über Spiegelneuronen verarbeiten, also auf verschiedenen ▷

Das System der Spiegelzellen dürfte im sozialen Kontext nützen. Elementare Verhaltensäußerungen werden ins motorische System eingebunden

▷ Ebenen. Ebenso dürften sie auch Gefühle von anderen nicht nur auf eine Weise registrieren. Zum einen kann natürlich der Verstand arbeiten, wenn wir sehen, dass jemand etwas fühlt. Unser Denkapparat folgert dann mittels logischer Operationen, was mit dem Gegenüber los ist.

Es scheint aber auch anders zu gehen. Die Wahrnehmung der Emotion eines Gegenübers würde dann unmittelbar auf die betreffenden Strukturen des eigenen Motorsystems projiziert, das im Betrachter daraufhin die gleiche Empfindung auslöst.

Wir haben es mit zwei völlig verschiedenen Wegen zu tun. Im ersten Fall erschließt der Beobachter zwar das Gefühlte rational, empfindet die Emotion aber nicht selbst. Dagegen kommt das Verständnis im zweiten Fall sozusagen gleich aus erster Hand – wirkliche Empathie, direkt vermittelt über das eigene (Mit-)Empfinden. Denn es wird der gleiche Gefühlszustand geweckt. Wir sagen: »Ich fühle mit dir« und ahnen wohl selten, wie wahr das ist.

Am Beispiel von Ekel lässt sich Empathie besonders eindrucksvoll demonstrieren. Ekel empfinden zu können – und auch zu zeigen –, sitzt tief in uns. Die oft unwillkürliche Emotion schützt uns in manchen potenziell bedrohlichen Situationen, zum Beispiel vor verdorbenem Essen. Ekel auszudrücken kann zugleich Mitglieder des Sozialverbands vor Schaden bewahren, denn unsere Reaktion signalisiert auch ihnen die potenzielle Gefahr.

Den einfachsten Fall, wenn jemand etwas Widerwärtiges schmeckt oder riecht, haben wir experimentell mit Tomografie untersucht, diesmal mit Hilfe französischer Kollegen. Wir ließen die Versuchspersonen einerseits etwas Verdorbenes riechen. Andererseits sahen sie Filmaufnahmen davon, wie jemand anderes an etwas Fauligem schnupperte. Gleich ob der Proband den Faulgeruch selbst in der Nase hatte oder sah, wie jemand das Gesicht verzog – dieselbe Hirnstruktur sprach an: die vordere Insula und darin sogar zum Teil genau dieselben Gebiete (siehe Kasten unten). Wir vermuten, dass dortige Spiegelzellpopulationen beide Male aktiviert wurden. Anders gesagt: Es scheint einen neuronalen Mechanismus zu geben, der beiden Standpunkten gemeinsam ist, der Beobachteten und Beobachter verbindet. Deswegen erlebt der Beobachter die Situation des anderen unmittelbar mit.

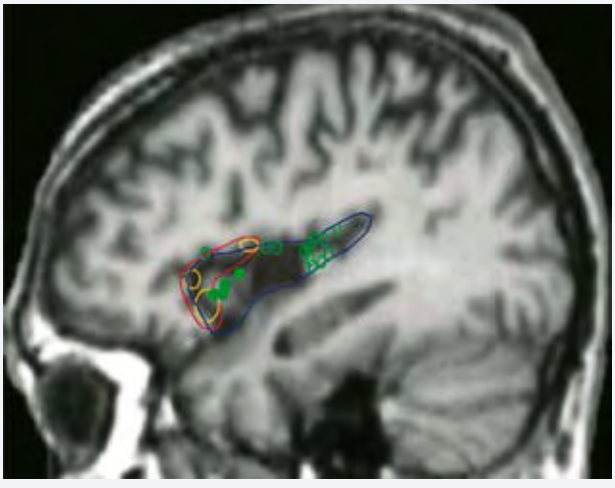
Eine ähnliche Übereinstimmung der Reaktionsmuster entdeckten Tania Singer und ihre Kollegen vom University College London für zugefügten und nur mitempfundenen Schmerz. In dieser Studie bekamen die Teilnehmer zuerst über Elektroden leichte, nur wenig schmerzhafte Stromschläge an der Hand. Dann sahen sie, wie die Elektroden an die Hand einer anderen Person gehalten wurden und wie diese dann Schmerzsignale gab. Auch jetzt wurden im Gehirn der Testteilnehmer beide Male jeweils dieselben Gebiete aktiviert.

Beobachtungen wie diese stützen die These, dass Menschen Gefühle anderer – zumindest stark aversive, negative Emotionen – deswegen so leicht und direkt verstehen können, weil dabei ein Projektionsmechanismus mitwirkt, der unmittelbar Reaktionen im motorischen System erzeugt. Selbstverständlich gilt das für soziale Wahrnehmung und soziales Begreifen nicht generell. Immerhin belegen solche Versuche aber erstmals für einige Aspekte im Kontext zwischenmenschlicher Beziehungen eine neuronale Verankerung. Komplexeres Sozialverhalten mag hierauf aufbauen. Der Spiegelmechanismus könnte zum Beispiel eine Grundlage darstellen, aus der Empathie erwächst. Dazu diskutieren Forscher nun auch, ob Fehler in diesem System vielleicht mangelndes Einfühlungsvermögen bedingen, wie etwa bei Autismus vermutet (siehe nächste Ausgabe von Spektrum der Wissenschaft).

Empathie scheint auf der Grundlage des Spiegelzellmechanismus zu entstehen – über die Projektion im motorischen System

Gespiegeltes Gefühl

Ist dies ein neuronaler Mechanismus für Empathie? Hier eine Studie über die Empfindung »Ekel«: Versuchspersonen rochen an etwas Widerwärtigem oder sie sahen einen Film, in dem jemand an etwas schnupperte und angewidert das Gesicht verzog. In beiden Fällen meldeten sich Stellen im Gehirn im gleichen Gebiet der Insula (rot: aktiviert beim selbst Riechen; gelb: aktiviert beim Sehen des Films; blau: untersuchte Region; grün: Daten von einer anderen Studie).



EKEL-FOTOS AUS: GIACOMO RIZZOLATTI ET AL., BOTH UF US DISGUSTED IN MY INSULA, IN: NEURON 2003, BD. 40, NR. 3, S. 655; HIRNSCAN AUS: G. RIZZOLATTI ET AL., A UNIFYING VIEW OF THE BASIS OF SOCIAL COGNITION, IN: TRENDS IN COGN. SCIENCES 2004, BD. 8, S. 396; BEIDES MIT GEN. VON ELSEVIER

Dass sich inzwischen so viele Forschergruppen den Spiegelneuronen widmen, hängt nicht nur mit reinem Erkenntnisinteresse zusammen. Denn dieses Wissen könnte auch von therapeutischem Nutzen sein. Was wäre, wenn Erfahrung das Spiegelsystem prägt? Nehmen wir zum Beispiel an, die Anweisung für einen oft geübten Bewegungsablauf würde teilweise als Schablone im Spiegelsystem abgelegt. Dann könnte man bei manchen Hirnschäden, etwa bei einem Schlaganfall, hierauf zugreifen. Nach neueren Befunden scheint das Spiegelsystem zumindest im normalen Alltag dabei zu helfen, neue Bewegungsmuster zu erlernen.

Gabe der Nachahmung

Das Nachahmungstalent der Tieraffen ist dürftig. Selbst das der Menschenaffen hat seine Grenzen. Erst beim Menschen gewinnt es enorme Bedeutung. Dank dessen erwerben wir viele kulturell geprägte Fertigkeiten, auch Sprache. Bildete das Spiegelneuronensystem den Nährboden für unsere Überlegenheit in dieser Hinsicht? Den ersten Hinweis darauf lieferten Iacoboni und seine Kollegen. Die Forscher zeichneten Hirnaktivitäten von Versuchspersonen auf, während diese Fingerbewegungen beobachteten und dann imitierten. Beides erregte die untere Stirnhirnwindung, ein Gebiet des Spiegelsystems. Bei gezielten Bewegungen war die Reaktion besonders stark.

Allerdings handelte es sich in diesen Experimenten durchweg um einfache und häufig ausgeübte Bewegungen. Was würde bei komplexeren, für den Teilnehmer neuartigen solchen Aufgaben geschehen? Giovanni Buccino von der Universität Parma hat (damals am Forschungszentrum Jülich) gemeinsam mit deutschen Kollegen Hirnaufnahmen von Versuchsteilnehmern gemacht, die nicht Gitarre spielen konnten. Zuerst sahen die Laien verschiedene Griffe eines versierten Gitarristen, dann sollten sie diese nachmachen. Allein schon beim Zusehen wurde das Spiegelneuronensystem im Scheitel- und Frontallappen aktiv. Der Versuch, die Griffe selbst auszuführen, aktivierte dieses Gebiet sogar noch stärker.

Interessanterweise regte sich in der kurzen Pause zwischen den beiden Versuchsabschnitten – während sich die Teilnehmer innerlich darauf vorbereiteten, den Griff auszuführen – noch ein anderer Hirnbereich: die so genannte Area 46. Dieses Gebiet gilt seit Langem als wichtig für Bewegungsplanungen und das so genannte Arbeitsgedächtnis. Möglich, dass die Area 46 wesentlich beteiligt ist, wenn es gilt, die Elemente einer komplexen Bewegung zusammenzubringen, die gleich imitiert werden soll.

Was im Gehirn beim Nachahmen geschieht, war Forschern lange ein Rätsel – vor allem die Frage, wie ein beobachteter Verhaltensablauf in eine eigene Bewegung übersetzt wird. Sollte das Spiegelsystem dazu als Brücke dienen, könnte es womöglich mehr leisten, als nur Verhaltensäußerungen anderer Individuen zu begreifen, ihre Absichten zu erkennen oder Gefühle zu verstehen. Denn vielleicht wurde dieses besondere System außerdem zu einem wichtigen Element der Begabung des Menschen, geistig anspruchsvolle Fertigkeiten mit Unterstützung von Beobachtung und Imitation zu erlernen (siehe auch: »Der Ursprung unseres Verstandes«, Spektrum der Wissenschaft Dossier 4/2005, S. 12).

Noch wissen wir nicht, ob das Spiegelsystem außer bei Primaten auch bei anderen Tieren vorkommt. Unsere Gruppe untersucht dies derzeit bei Ratten. Womöglich bildete sich das Phänomen tatsächlich erst spät in der Evolution heraus – was erklären würde, wieso es beim Menschen so viel stärker als bei Affen hervortritt. Wie menschliche Neugeborene imitieren auch Affenbabys bestimmte einfache Gesten und Mimiken, etwa die Zunge herauszustrecken. Von beobachteten Verhaltensakten eine Spiegelschablone anzulegen, ist möglicherweise ein angeborenes Talent. In einem anderen unserer Projekte untersuchen wir, ob bei autistischen Kindern Bewegungsdefizite auftreten, die auf grundlegende Fehlfunktionen im System der Spiegelzellen hinweisen könnten.

Es ist gerade zehn Jahre her, seit unsere erste Arbeit über Spiegelneuronen erschien. Noch sind dazu viele Fragen offen. Ungelöst ist zum Beispiel ihre mögliche Beteiligung am Sprachvermögen, einer unserer höchsten kognitiven Fähigkeiten. Zum Spiegelsystem gehört das Broca-Areal, unser Zentrum für Sprachproduktion. Manche Linguisten vermuten, dass Menschen zuerst mit Mimik und Gesten miteinander »sprachen«. Falls das zutrifft, hätten Spiegelneuronen auch für die Sprachevolution eine hohe Bedeutung gehabt.

Der Spiegelmechanismus kann zwei grundlegende Erscheinungen der Kommunikation erklären: die innere Übereinstimmung zweier Menschen sowie direktes gegenseitiges Verstehen. Innere Übereinstimmung meint, dass Sender und Empfänger einer Botschaft dieselbe Bedeutung beimessen. Direktes Verstehen benötigt weiter keine Vorabsprachen, auch nicht in Form irgendwelcher Zeichen. Derart zusammenstimmen zu können – dazu sind wir auf Grund unserer neuronalen Organisation von Natur aus veranlagt. Dank des Spiegelsystems können wir Menschen uns auf mehreren Ebenen miteinander verständigen. Deswegen, so glauben wir, verstehen sich Anna und Peter auch ohne Worte. ◁

IM APRIL-HEFT:
Spiegelneuronen und Autismus

Giacomo Rizzolatti (oben), **Leonardo Fogassi** (Mitte) und **Vittorio Gallese** arbeiten an der Universität Parma (Italien) in der Abteilung für Neurowissenschaften. Rizzolatti ist dort Direktor, Fogassi und Gallese sind außerordentliche Professoren. Gemeinsam mit Luciano Fadiga entdeckten sie in den frühen 1990er Jahren die Spiegelneuronen.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

(Drei ausführliche Beiträge über die Funktion und den therapeutischen Wert von Spiegelneuronen) in: Gehirn& Geist 10/2006, S. 26, 34 und 41

Parietal lobe: from action organization to intention understanding. Von Leonardo Fogassi et al. in: Science, Bd. 302, S. 662, 29. April 2005

Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. Von Marco Iacoboni et al. in: Public Library of Science Biology, Bd. 3, Heft 3, S. 529, März 2005

The mirror neuron system. Von Giacomo Rizzolatti und Laila Craighero in: Annual Review of Neuroscience, Bd. 27, S. 169, Juli 2004

A unifying view of the basis of social cognition. Von Vittorio Gallese, Christian Keysers und Giacomo Rizzolatti in: Trends in Cognitive Sciences, Bd. 8, S. 396, 2004

Action recognition in the premotor cortex. Von Vittorio Gallese, Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi und Giacomo Rizzolatti in: Brain, Bd. 119, Heft. 2, S. 593, April 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864267.

Weißes Laserlicht

Spezielle Laser erzeugen intensive Lichtblitze, deren Spektrum sich über ein breites Frequenzband erstreckt. Diese »weißen« Strahlungspulse ermöglichen ungeahnt präzise Zeitmessungen und die rapide Übertragung riesiger Datenmengen.

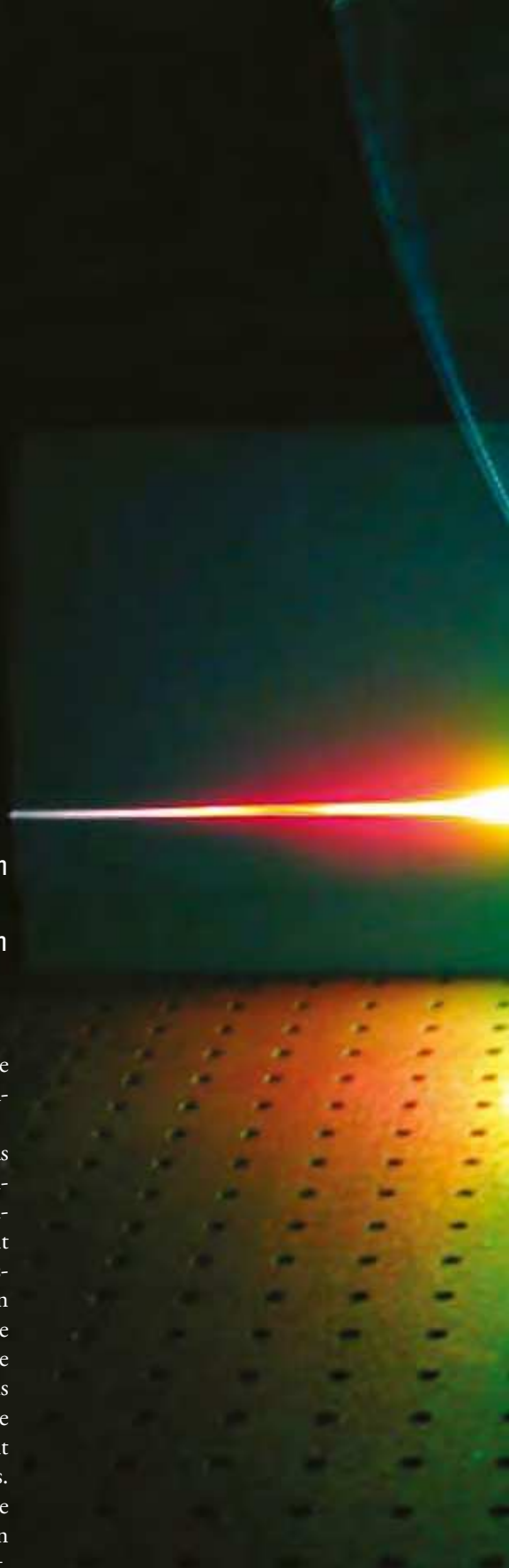
Von Robert R. Alfano

Licht ist eines der wichtigsten und vielseitigsten Naturphänomene. Wie ein Bote kann es Information von einem Punkt zum anderen übertragen, wie ein Alchemist vermag es Materie zu verändern. Es kann chemische und biologische Prozesse auslösen und steuern. Und natürlich könnten wir ohne Licht nichts sehen.

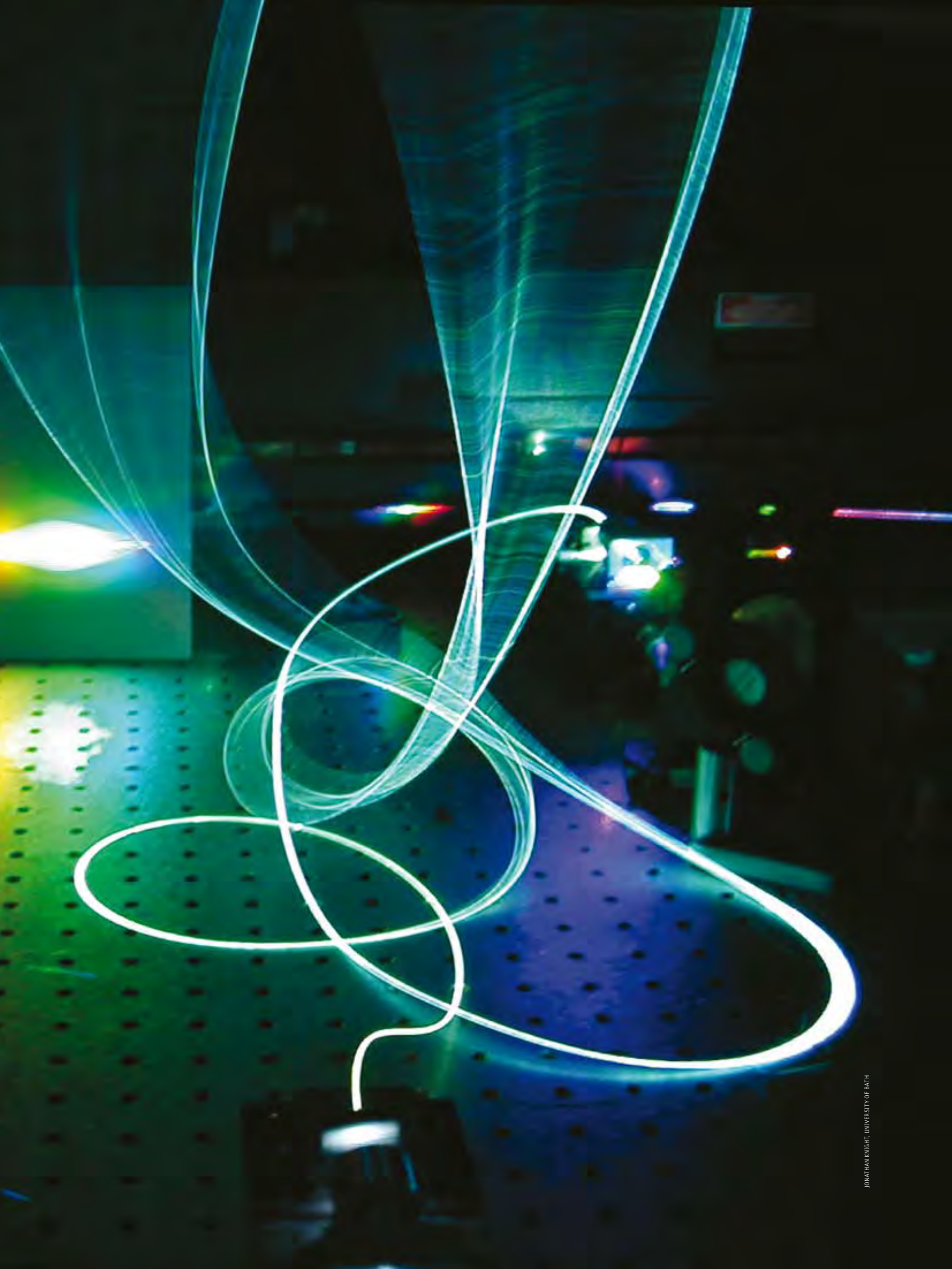
Es nimmt die vielfältigsten Formen an: kurze Blitze, fokussierte Punkte, breite dauerhafte Strahlen, trübes oder grelles Licht, polarisiertes, nieder- oder hochfrequentes Licht und solches, das viele Frequenzen auf einmal enthält. Die Farbe sichtbaren Lichts wird durch die Frequenz bestimmt, die eng mit der Wellenlänge zusammenhängt: je kürzer die Wellenlänge, desto größer die Frequenz. Eine gewöhnliche Glühlampe emittiert elektromagnetische Strahlung über das gesamte optische Spektrum hinweg und erscheint darum weiß.

Doch für technische Zwecke hat das Licht einer Glühbirne mehrere Nachteile: Es ist wenig intensiv, nicht kollimiert (parallel ausgerichtet) und nicht kohärent – das heißt, die Strahlungspartikel oder Photonen schwingen nicht in Phase. Laser lösen alle diese Probleme, aber dafür emittieren sie kein weißes Licht, sondern bestenfalls ein schmales Frequenzband. Für viele Anwendungen reicht kohärentes Licht einer einzigen Frequenz völlig aus. Doch eine Strahlungsquelle, welche die Vorzüge eines Lasers mit der großen Bandbreite einer Glühlampe verbindet, eröffnet ganz neue Möglichkeiten.

Während ich 1969 an der New York University meine Doktorarbeit schrieb, arbeitete ich mit Stanley L. Shapiro als Techniker in den Labors der Firma General Telephone and Electronics – ▷



Das Superkontinuum-Licht, das hier in einer Glasfaser erzeugt wird, hat viele Eigenschaften des Laserlichts. Außerdem umfasst es ein sehr breites Frequenzband. Dies demonstriert das Gesamtspektrum des Superkontinuums, das auf den Schirm im Hintergrund projiziert wird.



JONATHAN KNIGHT, UNIVERSITY OF BATH

▷ jetzt Verizon – in Bayside (New York). Zusammen erfanden wir ein neuartiges Laserlicht, das einen großen Teil des optischen Spektrums enthält. Ich prägte dafür den Namen Superkontinuum oder kurz SC (von *supercontinuum*), sofern das Spektrum eine Oktave oder mehr umfasst. Wie eine Klangoktave erstreckt sich eine Lichtoktave von einer Frequenz bis zum Doppelten ihres Werts. Das optische Spektrum entspricht ungefähr einer Oktave, und somit verwirklicht das Superkontinuum den Traum von weißem Laserlicht.

Laserlicht mit dieser Bandbreite ermöglicht sehr nützliche Kunststücke. John L. Hall von der Universität von Colorado und dem National Institute of Standards and Technology in Boulder sowie Theodor W. Hänsch vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching teilten sich (mit Roy J. Glauber) den Physik-Nobelpreis 2005, weil ihnen mit solchem Licht extrem genaue Zeit- und Frequenzmessungen gelangen. Das SC erzeugten Shapiro und ich, indem wir hochintensive Pulse grünen Laserlichts, die nur Pikosekunden (billionstel oder 10^{-12} Sekunden) dauerten, durch spezielle Kristalle oder Gläser sandten. Eigentlich wollte ich damit erstmals die Lebensdauer hochfrequenter Schwingungsanregungen, so genannter Phononen, in Calcit-Kristallen messen. Dabei beobachtete ich, dass weißes Licht entstand: Durch Wechselwirkung der Lichtpulse mit dem Medium wurde ihre Bandbreite erheblich erweitert. Später verwendeten wir auch Flüssigkeiten, und andere nutzten als Medium zusätzlich Gase, um das SC-Spektrum bis ins Infrarot hinein auszudehnen.

Zuerst wurde mit dem SC die Dynamik von Schwingungsanregungen in Flüssigkeiten untersucht. Bald darauf diente das SC den Forschern auch als neuartiges Werkzeug zur Untersuchung grundlegender Prozesse im Pikosekunden- und Femtosekundenbereich (10^{-15} Sekunden). Dazu gehören chemische Ereignisse, die eintreten, wenn Licht bei der Photosynthese oder beim Sehvorgang absorbiert wird, sowie die Einzelschritte, aus denen chemische Reaktionen bestehen, und schließlich Vorgänge, bei denen durch Licht angeregte Moleküle ihre Energie nicht wieder in Form von Licht abgeben.

Wie ein Superkontinuum entsteht

1999 erlebte die SC-Forschung einen neuen Boom, als Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler und Andrew J. Stentz von der Firma Lucent Technologies ein Superkontinuum in einer speziellen Glasfaser erzeugten. Die Faser hat unter anderem den Vorteil, das Licht auf einen kleinen Querschnitt zu beschränken; dadurch bleibt es selbst über große Distanzen sehr intensiv. Das ist wichtig, denn die nichtlinearen Prozesse, auf denen das SC beruht, werden bei hohen Intensitäten ausgeprägter. Die Forscher können zudem die optischen Eigenschaften der Faser für verschiedene Frequenzen so variieren, dass die SC-Erzeugung optimiert wird und neue physikalische Effekte für die Manipulation des Lichts ins Spiel kommen. Infolgedessen gibt es heute für das SC vielfältige Anwendungen – extrem präzise Zeit- und Frequenzmessungen, optische Breitbandkommunikation, Atmosphärenforschung, ein bildgebendes Verfahren namens optische Kohärenztomografie, die Kompression ultrakurzer Pulse zu noch kürzeren Zeitspannen und vielleicht bald lokale Gravitationsmessungen zum Aufspüren von Erdöl und Mineralien.

Viele unterschiedliche physikalische Effekte können zur Erweiterung der Bandbreite beitragen, aus der SC-Pulse hervorgehen. Der wichtigste Prozess ist die so genannte Selbstphasenmodulation; dabei modifiziert das Licht das durchquerte Material so, dass das veränderte Material seinerseits auf das Licht einwirkt und dessen Bandbreite erhöht. Um zu verstehen, wie das geht, betrachten wir die Wellenform eines Laserpulses im Detail: Ein Diagramm des elektrischen Pulsfelds zeigt eine Folge von Schwingungen, die klein beginnen, auf ein Maximum anwachsen und dann wieder auf null absinken (siehe Kasten S. 63). Die Hüllkurve der Schwingungen definiert, wie die Lichtintensität erst stetig steigt und dann im Lauf des Pulses wieder fällt. Wie die Schwingungen durch das Medium wandern, hängt von dessen Brechzahl ab; sie ist definiert als Quotient der Vakuumlichtgeschwindigkeit geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit im Medium.

Wenn der Puls nun genügend intensiv ist, verzerrt das elektrische Feld der Welle die Elektronenwolken der Atome im Medium so stark, dass die Brechzahl an dieser Stelle ein wenig erhöht wird. Dieses Phänomen heißt optischer Kerr-Effekt. Er verändert die Phase der Pulsschwingungen, das heißt, er verschiebt die Positionen der Wellenberge und -täler. Insbesondere verzögert eine erhöhte Brechzahl diese Berge und Täler.

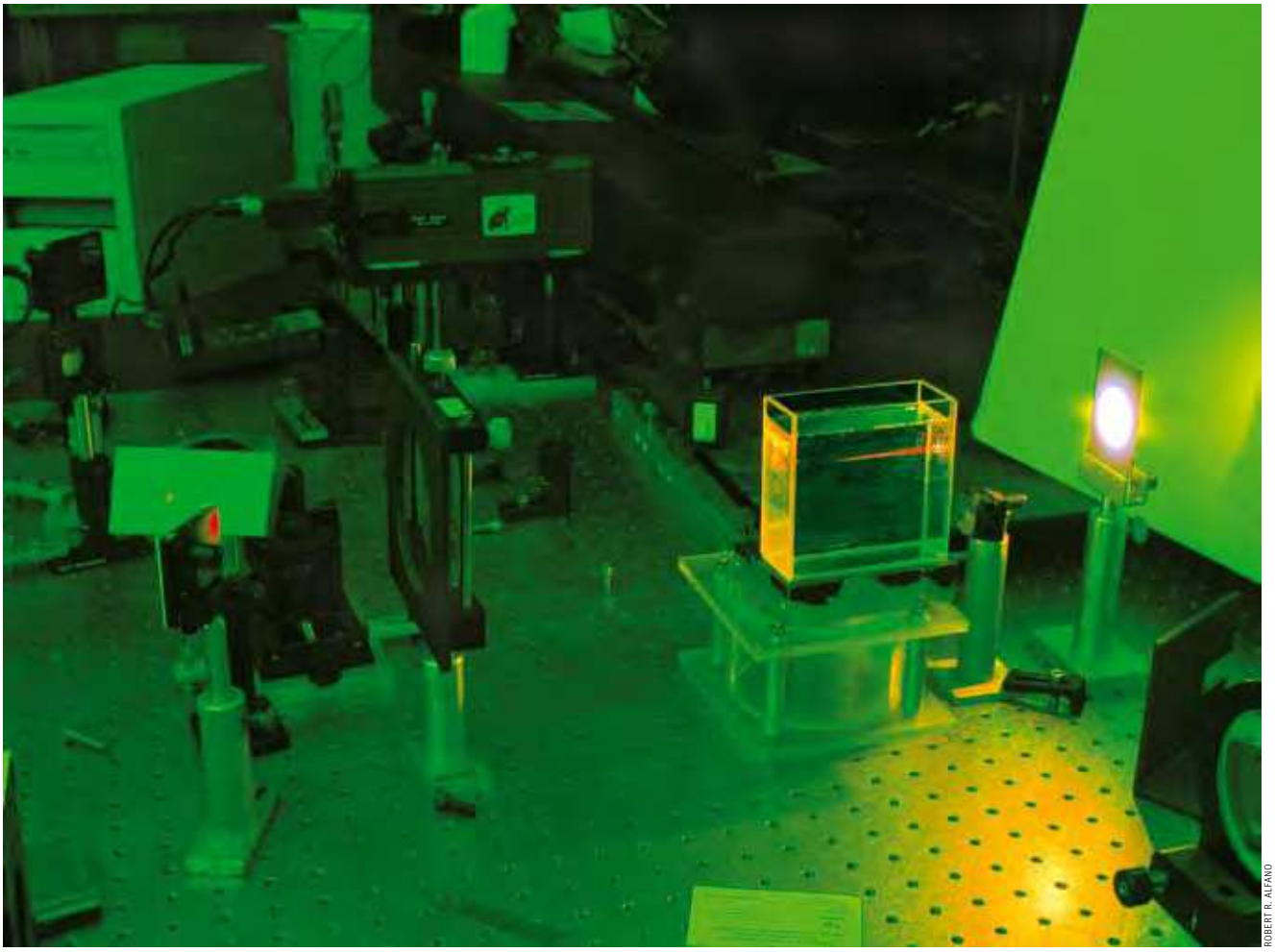
Der Betrag, um den die Brechzahl zunimmt, hängt von der Lichtintensität ab. Darum variiert die Brechzahl, während der Puls einen bestimmten Ort im Medium passiert, an dieser Stelle kontinuierlich, und ebenso variieren auch die erzeugten Phasenverschiebungen. In der vorderen Hälfte des Pulses wachsen die Intensität und folglich auch die Brechzahl mit der Zeit; dadurch werden die relativen Positionen der Berge und Täler zunehmend verzögert, und die Frequenz der Welle nimmt ab.

Wenn der Puls das Medium verlässt, sind seine Schwingungen an der Pulsfront gedehnt und am Ende gestaucht. Im Diagramm ähnelt das einer zwischen zwei Punkten gespannten Sprungfeder, wobei die Mitte der Feder ein wenig zu einem Ende verschoben ist.

Die Erweiterung der Bandbreite wird klarer, wenn wir das Spektrum des Pulses betrachten, das heißt die Intensität jeder darin vorhandenen Frequenz oder Wel-

In Kürze

- **Laserlicht ist hochintensiv und kohärent**, doch normalerweise enthält es im Unterschied zu weißem Licht nur ein schmales Frequenzband. Erst das »Superkontinuum« kombiniert die Vorzüge des Lasers mit der **großen Bandbreite** von weißem Licht.
- Um Superkontinuumlicht zu erzeugen, schickt man hochintensive Laserpulse durch speziell konstruierte Glasfasern. Auf dem Weg durch die Faser löst das Licht im Material mehrere **nichtlineare optische Prozesse** aus, die seine Bandbreite stetig erweitern.
- Zu den **Anwendungen** zählen extrem genaue Frequenz- und Zeitmessungen, der blitzschnelle Transport enormer Datenmengen, der Nachweis von Chemikalien in der Luft und bildgebende Verfahren für die Medizin.



ROBERT R. ALFANO

In diesem Laboraufbau entsteht Superkontinuum-Licht, indem hochintensives Laserlicht (rot) durch ein passendes optisches Medium geschickt wird – hier ein Behälter mit Flüssigkeit. Die Bandbreite des Lichts wird auf diese Weise enorm erweitert (weißes Licht).

lenlänge. Schon bevor der optische Kerr-Effekt ins Spiel kommt, besteht ein Puls keineswegs aus nur einer reinen Frequenz. Vielmehr muss man sich den Puls als Wellenpaket, als Überlagerung vieler verschiedener Frequenzen vorstellen. Für Laser ist typisch, dass sie Licht spezifischer diskreter Wellenlängen erzeugen. Darum bildet das Frequenzspektrum eines Laserpulses einen so genannten Frequenzkamm: Das Diagramm zeigt eine gleichmäßige Abfolge von Zacken, deren Hüllkurve wiederum Pulsform hat. Die Breite dieser Hüllkurve definiert die Bandbreite oder den vorhandenen Frequenzbereich. Nachdem ein intensiver Puls ein Medium mit deutlichem Kerr-Effekt passiert hat, ist seine Frequenzhüllkurve erweitert.

Bei unserer Entdeckung des SC im Jahr 1969 benutzten Shapiro und ich Pikosekundenpulse mit einem Millijoule Energie. Das hört sich bescheiden an; ein Millijoule reicht gerade aus, eine Büroklammer ein paar Zentimeter hochzuheben. Aber wenn diese Energie in eine Pikosekunde gepackt und auf einen kleinen Fleck fokussiert wird, entspricht sie einem Gigawatt Leistung und extrem hoher Intensität; in dem kurzen Intervall kann sie wahre Wunderdinge vollbringen. Die hohe Intensität brauchten wir, weil die Pulse nur ein paar Zentimeter Glas mit aktivem Kerr-Effekt durchqueren konnten. Wegen der hohen Intensität war der Effekt so stark, dass er selbst in der kurzen Zeit, welche die Pulse im Glas verbrachten, ihre Bandbreite beträchtlich erweiterte.

Wenn die Pulse im Glas mehr als nur wenige Zentimeter zurücklegten, begannen sie auseinanderzulaufen; daran war eine andere mit der Brechzahl zusammenhängende Eigenschaft schuld, die so genannte Dispersion des Mediums. In einem normalen Medium bedeutet Dispersion, dass die Brechzahl für Licht höherer Frequenz ein wenig größer ist, wodurch es gegenüber niedrigen Frequenzen verlangsamt wird. Infolgedessen pflanzen sich die unterschiedlichen Frequenzbestandteile des Pulses verschieden schnell fort, und der Puls, dessen Existenz davon abhängt, dass alle Frequenzen im Zentrum des Pulses genau abgestimmt – »in Phase« – sind, wird rasch verschmiert.

Die Glasfasern, die Ranka und seine Mitarbeiter 1999 erstmals verwendeten, überwinden dieses Problem durch untypische Dispersionseigenschaften wie Nulldispersion und anomale Dispersion; bei Letzterer nimmt die Brechzahl mit wachsender Lichtfrequenz ab. In solchen Fasern können sich SC-Pulse tausendmal weiter fortpflanzen, ohne zu zerlaufen. Weil die Pulse viel länger in der Faser unterwegs sind, haben Phänomene wie der Kerr-Effekt mehr Zeit sich auszuwirken und müssen darum nicht so stark sein. Das wiederum bedeutet: Das Superkontinuum kann mit Lasern geringe- ▷

▷ rer Leistung erzeugt werden, die an Stelle der früher benutzten Millijoule-Pulse nur Mikrojoule- und sogar Nanojoule-Pulse emittieren.

Ein weiteres Phänomen spielt eine wichtige Rolle, wenn die Faser anomale Dispersion beim Frequenzband des Input-Pulses aufweist. In diesem Fall entwickelt sich jeder Puls zu einer besonderen Wellenart namens Soliton. Für ein Soliton ist charakteristisch, dass es seine Form unterwegs nicht ändert, während ein normaler Puls allmählich zerläuft. Solitonen sind so formstabil, weil in ihrem Fall die anomale Dispersion andere Effekte des Mediums kompensiert. In einem Material mit anomaler Dispersion erzeugen diese Solitonen das SC; sie treten an die Stelle der früher beschriebenen Selbstphasenmodulation.

Jedenfalls wird bei normaler wie bei anomaler Dispersion die Bandbreite des SC durch viele nichtlineare optische Effekte weiter vergrößert, etwa durch Vierwellenmischung und Raman-Prozesse. Bei der Vierwellenmischung wirken drei Lichtfrequenzen in einem nichtlinearen optischen Medium so zusammen, dass Licht einer vierten Frequenz entsteht. Bei Raman-Prozessen tritt Licht in Wechselwirkung mit den Schwingungsanregungen der Moleküle, aus denen das Medium besteht, das heißt mit Phononen. Dadurch verlieren oder gewinnen die Photonen des Lichts Energie, und entsprechend ändert sich ihre Frequenz.

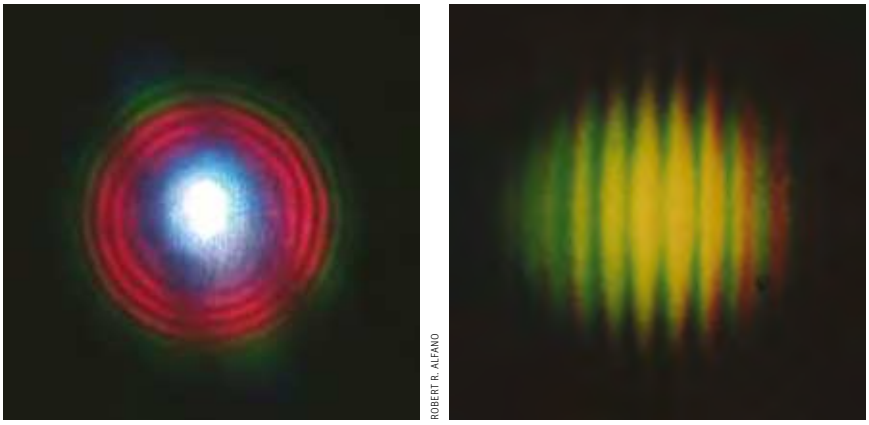
Mehr oder weniger tragen all diese Wechselwirkungen gemeinsam zur Entwicklung der Pulse bei. Welche Prozesse dominieren, hängt von sämtlichen Faktoren ab, welche die Forscher variieren können: Frequenz, Intensität und Dauer der Input-Pulse sowie optische Eigenschaften der Faser. Für eine zuverlässige Vorhersage des Endresultats ist man auf Computersimulationen der Lichtpulse in Fasern angewiesen. Andernfalls riskiert man Experimente mit ungewissem Ausgang.

Kunstvolle Messungen

Zur SC-Erzeugung dienen spezielle Mikrostrukturfasern. Ihr Querschnitt zeigt ein Lochmuster, das kontinuierlich durch die gesamte Faser läuft (siehe Kasten S. 64). In einer häufig benutzten Ausführung umgibt das Lochmuster einen festen Glaskern, wie eine Bienenwabe mit nur einer gefüllten Zelle in der Mitte. Der Kern hat eine viel höhere Brechzahl als der umgebende Mantel mit seinen Luftlöchern im Glas. Diese konzentrische Anordnung der Brechzahlen bewirkt, dass die Lichtpulse innerhalb der Faser geführt werden. Mit Hilfe solcher Fasern mit Null- und anomaler Dispersion erzeugen die Forscher SC-Licht, das sich über zwei Oktaven hinweg vom Infrarot bis zum Ultraviolett erstreckt.

Wie erwähnt eröffnet das SC-Licht eine Fülle von Anwendungen. Die wichtigste und am meisten ausgereifte ist die Entwicklung extrem genauer Uhren und Frequenzmessungen. In diesem Bereich wird das SC für so genannte optische Frequenzkammverfahren genutzt; sie ermöglichen bessere Genauigkeit mit viel einfacheren und kleineren Systemen als früher. Insbesondere erfordert ein Trick namens Selbstreferenz, den die Gruppen um Hänsch und Hall im Jahr 2000 unabhängig voneinander demonstrierten, dass der Frequenzkamm eine volle Oktave umfasst. Bei dieser Methode verdoppeln die Forscher die Frequenz des Lichts am niederfrequenten Ende des Spektrums und lassen es mit dem hochfrequenten Ende interferieren.

Aufbauend auf den Arbeiten von Hall und Hänsch versuchen Wissen-



ROBERT R. ALFANO

Ein typisches Beugungsphänomen wie die Streuung einer Welle hinter einer kleinen Öffnung kann das Entstehen eines Superkontinuums beeinflussen. Im linken Bild passiert ein infraroter Laserstrahl ein nur 300 Mikrometer großes Loch, wird gebeugt und fällt auf ein Glasplättchen; der dort erzeugte Lichtfleck ist so intensiv, dass ein Superkontinuum entsteht (weiß). Im rechten Bild erzeugt Licht, das an einer geraden Kante gebeugt wurde, zwei Lichtflecke, die ihrerseits ein Superkontinuum bilden. Die beiden Strahlen überlagern einander und erzeugen typische Interferenzlinien.

schaftler nun Systeme zu entwickeln, die Frequenzen mit einer Messgenauigkeit von 10^{-16} bis 10^{-18} zu bestimmen vermögen; bisher ist 10^{-14} das Optimum. Diese extreme Exaktheit hätte praktischen Wert für das Global Positioning System, die Weltraumnavigation und das Ausrichten sehr großer Radioteleskop-Anordnungen. Außerdem wäre sie nützlich für Tests der Speziellen Relativitätstheorie und verwandter Grundprinzipien wie der Isotropie des Raums, der Symmetrie von Materie und Antimaterie und der Konstanz der Naturkonstanten (siehe »An den Grenzen von Einsteins Theorie« von Alan Kostelecký, Spektrum Spezial 1/2005, S. 68, »Künstliche kalte Antimaterie« von Graham P. Collins, Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 62 und »Veränderliche Naturkonstanten« von John D. Barrow und John K. Webb, Spektrum der Wissenschaft 10/2005, S. 78).

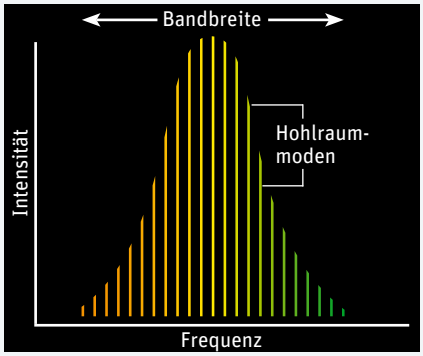
Frequenzmessungen und Uhren sind zwei Fassetten derselben Technik. Forscher streben derzeit Uhren mit einer Messgenauigkeit von einer Femtosekunde an. Letztlich könnte der optische Frequenzkamm Genauigkeiten bis zu 10^{-18} ermöglichen; das wäre ideal für das Takten optischer Computer und vielleicht auch für das Aufspüren von Erdöl- und Minerallagerstätten anhand winziger Abweichungen des örtlichen Schwerefelds.

Superlicht für die Datenübertragung

Eine Anwendung mit unmittelbar kommerziellem Nutzen ist die Fernmeldetechnik. Das Superkontinuum wäre eine ideale Grundlage für Telekommunikationssysteme, die Daten tausendmal schneller zu übertragen vermögen als heutige Anlagen. Glasfasern, die infrarotes Licht leiten, sind bereits das am häufigsten genutzte Mittel, um Daten rasch über weite Entfernungen zu senden. Wissenschaftler und Ingenieure sind unablässig bemüht, immer mehr Daten in eine Faser zu pressen, um mit dem weltweit wachsenden Bedarf an leistungsfähigeren Kommunikationssystemen und Datennetzen Schritt zu halten. Als Ziel gelten Übertragungsraten von Terabits (10^{12}) und Petabits (10^{15}) pro Sekunde. Typische Glasfasersysteme transportieren derzeit von Stadt zu Stadt rund zehn Gigabit pro Sekunde; das entspricht nur 0,01 Terabit. ▷

Wie Superkontinuum-Licht erzeugt wird

Gepulste Laser emittieren Lichtblitze in einem engen Frequenzbereich. Wenn ein genügend intensiver Puls eine Glasfaser durchläuft, treten gewisse nichtlineare Prozesse auf, unter anderem die so genannte Selbstphasenmodulation. Diese Prozesse erzeugen zusätzliche Lichtfrequenzen und liefern schließlich ein Superkontinuum mit breitem Spektrum.

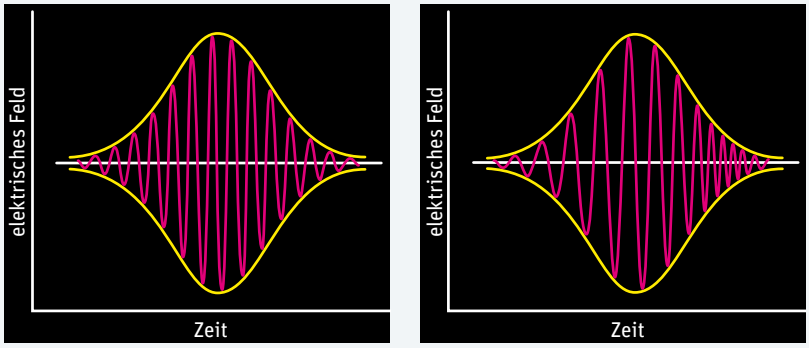


Frequenzkamm

Gepulste Laser emittieren eine wiederkehrende Pulsfolge. Jeder Puls ist die Summe vieler Teilstrahlen unterschiedlicher Frequenz. Das Spektrum der Pulsserie bildet einen Frequenzkamm – eine gleichmäßige Anordnung diskreter Frequenzen.

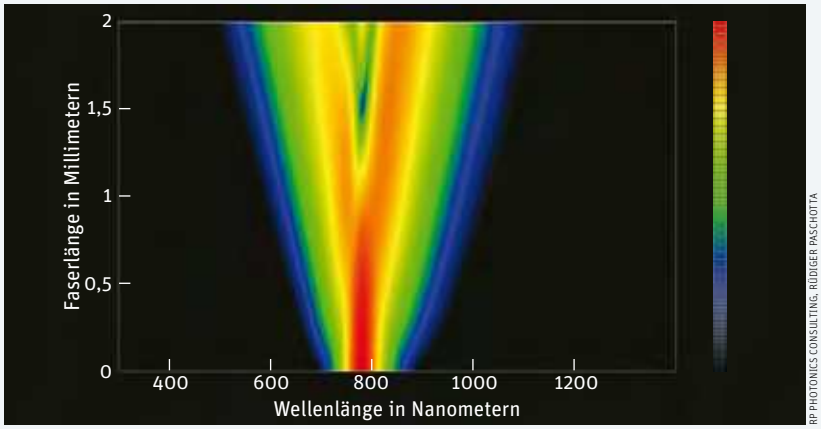
Selbstphasenmodulation

Die elektromagnetischen Schwingungen eines Laserpulses (links, pink) haben konstante Wellenlänge, doch die Intensität steigt und fällt gemäß einer Hüllkurve (gelb). Ein Puls mit hoher Spitzenintensität kann die Brechzahl des Mediums momentan um einen Betrag erhöhen, der proportional zur augenblicklichen Intensität ist. Da die Brechzahl des Mediums zeitlich variiert, verändert sie ihrerseits die Phase der Welle, das heißt die Lage der Wellenberge und -täler. So entstehen neue Wellenlängen und Frequenzen.



Spektralverbreiterung

Diese Simulation eines 20 Femtosekunden (2×10^{-14} Sekunden) langen Pulses auf seinem Weg durch eine Glasfaser zeigt, wie nichtlineare Effekte – insbesondere die Selbstphasenmodulation – das Pulsspektrum verbreitern. Die Farben stellen die Lichtintensität bei jeder Wellenlänge auf einer logarithmischen Skala dar; rot entspricht hoher Intensität. In diesem Beispiel erstreckt sich das Spektrum nach zwei Millimeter Wegstrecke über eine Oktave. Wie in der Musik reicht eine Lichtoktave von einer Frequenz bis zum Doppelten dieser Frequenz.



Mit seiner ultraweiten Bandbreite bietet das SC kostengünstigen Zugang zu zahlreichen Wellenlängenkanälen, die sonst Hunderte von Lasern erfordern. Diese Bandbreite ließe sich mit dem superdichten Wellenlängenmultiplexverfahren *(superdense wavelength-division multiplexing)* nutzen, bei dem Datenströme in vielen unterschiedlichen Lichtwellenlängen kodiert und simultan übertragen werden. Das SC kann, anders als das Licht von hundert einzelnen Lasern, über einen weiten Frequenzbereich kohärent sein. Das heißt, alle Kanäle schwingen im Takt, statt dass jedes einzelne schmale Band nach seiner eigenen Pfeife tanzt; dadurch lässt sich das Licht besser kontrollieren.

Eine andere Möglichkeit ist das Zeitmultiplexverfahren *(time-division multiplexing)*: Man sendet eine Folge ultrakurzer SC-Lichtpulse – jeweils kürzer als hundert Femtosekunden –, deren Abfolge separate und miteinander verschachtelte Datenkanäle repräsentiert. Bei derart kurzen Pulsen ist es wichtig, die Kontrolle über die präzise Relation zwischen der Trägerwelle – den Einzelschwingungen des elektrischen Felds – und der Hüllkurve des Pulses zu behalten. Diese Relation heißt relative Phase von Träger und Hülle; sie bestimmt, ob das Maximum der Pulshülle mit einem Wellenberg oder -tal des elektrischen Felds zusammenfällt oder irgendwo dazwischen liegt. Die Eigenschaften des SC erleichtern diese Kontrolle.

Mehrere japanische Teams erreichen bereits Terabit-Übertragungsraten, indem sie einen schmalen Ausschnitt des SC-Spektrums nutzen. Um das Tempo auf Petabits pro Sekunde zu steigern, müssen noch viele Hindernisse überwunden werden. Zu diesen Hürden zählt das Absenken der Dauer eines Bits auf eine Pikosekunde und das Steigern der Anzahl kohärenter Wellenlängen im Superkontinuum.

Laser für die Atmosphärenforschung

Für die Nachrichtentechnik wird das SC in der vollständig kontrollierten Umgebung einer Glasfaser produziert, aber für manche Zwecke soll es im Freien entstehen – etwa zur Fernerkundung der in Luft vorhandenen Molekülsorten für die Atmosphärenforschung. Wenn intensive ultraschnelle Laserpulse die Luft durchqueren, können sie lange und dünne Filamente ionisierter Gase erzeugen. Das heißt, in den Filamenten werden Elektronen von den Luftmolekülen abgetrennt, wodurch ein Plasma aus positiven Ionen und negativen Elektronen entsteht. Die Filamente können die Lichtpulse leiten und vor dem Zerlaufen bewahren. Die Wissenschaftler erklären diesen Vorgang als Selbstfokussierung der Pulse im ionisierten Plasma; die durch Beugung verursachte Defokussierung – das Auseinanderlaufen einer Welle hinter einer kleinen Öffnung – wird auf diese Weise kompensiert.

Auf dem Weg durch über zwanzig Meter lange Filamente kann sich ein beträchtlicher Teil der Pulsleistung in weißes SC-Licht umwandeln. Luftschadstoffe und Aerosole absorbieren Strahlung bei charakteristischen Frequenzen, und das breite Spektrum des SC-Lichts ermöglicht die gleichzeitige Entdeckung ihrer verräterischen Absorptionslinien im ultravioletten, optischen und infraroten Bereich.

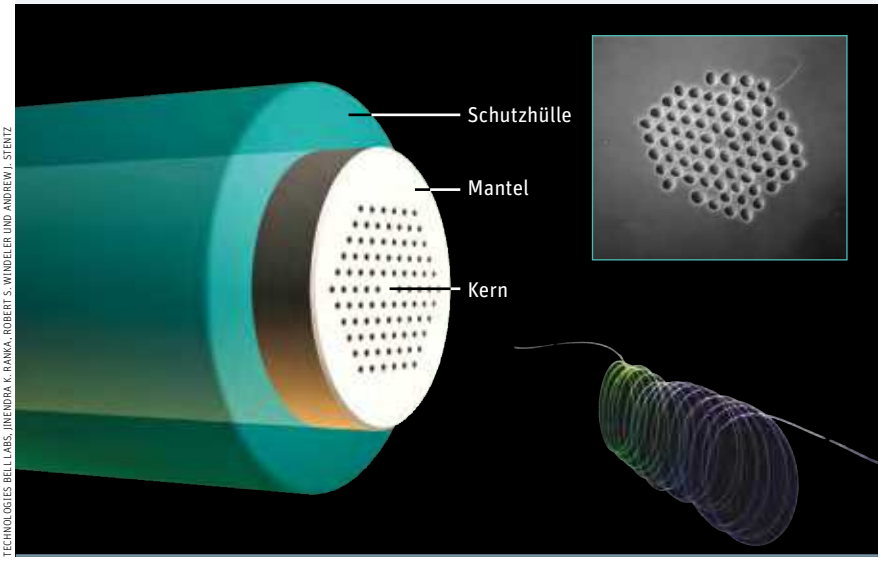
Das Superkontinuum vermag nicht nur die Atmosphäre zu durchleuchten, sondern liefert auch hochauflösende Bilder des Körperinnern. Die optische Kohärenztomografie, kurz OCT *(optical coherence tomography)*, hat James G. Fujimoto am Massachusetts Institute of Technology entwickelt; sie lässt sich nicht nur an herauspräparierten Gewebeproben durchführen, sondern auch in lebenden Organismen. Bei Tier und Mensch wird sie zur Untersuchung der Netzhaut, von Hautkrankheiten, Magen-Darm-Erkrankungen und Krebszellen eingesetzt.

Um ein OCT-Bild zu erzeugen, wird das Licht in zwei Teile aufgespaltet; der eine Teil beleuchtet einen Punkt der Probe, der andere – das Referenzlicht – tritt in eine Glasfaser ein. Wenn das Referenzlicht mit von der Probe reflektiertem oder gestreutem Licht überlagert wird, interferieren die beiden kräftig – vorausgesetzt, jede Komponente hat auf ihrer jeweiligen Reise gleich viel Zeit verbracht.

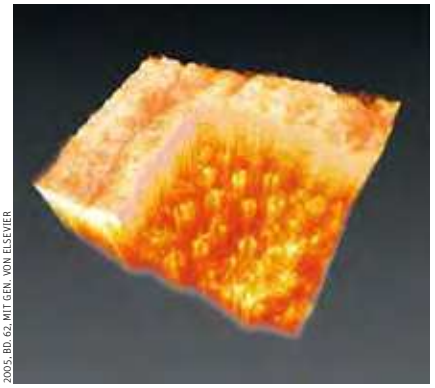
In der optischen Kohärenztomografie (OCT) wird Licht ähnlich wie Ultraschall eingesetzt, um Bilder zu erzeugen – allerdings mit viel höherer Auflösung. Diese dreidimensionalen OCT-Bilder von normalem Gewebe (links) und einem gutartigen Tumor (rechts), beides dem Dickdarm entnommen, offenbaren den für Tumore typischen Strukturverlust. Durch den Einsatz von Superkontinuum-Licht erhöhte sich hier die Auflösung gegenüber normalen OCT-Bildern auf das Vierfache.

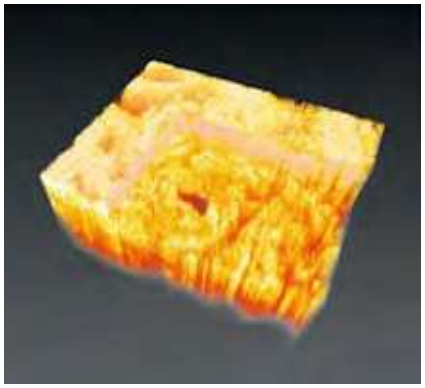
Mikrostrukturfasern

Glasfasern, die in Längsrichtung mit Luftlöchern versehen sind, revolutionieren Produktion und Anwendung von Superkontinuum-Licht. Die Löcher senken die Brechzahl im Mantel, der den engen Glaskern umgibt; dadurch wird das Licht auf den Kernbereich eingeschränkt. Die wechselnde Farbe des Lichts während seiner Wanderung durch die Faser zeigt die Erweiterung der Bandbreite an (unten rechts).



GLASFASERGRAFIK: MELISSA THOMAS; FOTO RECHTS UND SPIRALE: MIT FRDL. GEN. VON LUCENT TECHNOLOGIES BELL LABS, JINENDRA K. RANKA, ROBERT S. WINDELER UND ANDREW J. STENTZ





AUS: PEI-LIN HSIUNG ET AL.: ULTRAHIGH-RESOLUTION AND 3-DIMENSIONAL OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY. IN: GASTROINTESTINAL ENDOSCOPY 2005; BD. 62. MIT GEN. VON ELSEVIER

Eine entscheidende Eigenschaft des Lichts der Quelle ist die Kohärenzlänge; sie bestimmt, wie exakt die Wegzeiten übereinstimmen müssen. Hochauflösende OCT-Bildgebung beruht auf einer kurzen Kohärenzlänge, darum muss die Übereinstimmung sehr gut sein.

Somit wird, während der Lichtpunkt in die Probe vordringt, nur aus einer bestimmten Tiefe zurückkehrendes Licht mit dem Referenzlicht interferieren. Wenn das Licht die Probe seitlich abtastet, während die Wegzeit des Referenzlichts konstant gehalten wird, entsteht ein zweidimensionales Bild der Probe bei einer bestimmten Tiefe. Die Dicke der Schicht, die zum Bild beiträgt, heißt Axialauflösung des Bilds.

Die ersten OCT-Bildsysteme beruhten auf einer Diode als Strahlungsquelle und wiesen eine Axialauflösung von 10 bis 15 Mikrometern (tausendstel Millimetern) auf. Zum Vergleich: Mit hochfrequentem Ultraschall fabrizierte Bilder haben eine Auflösung von rund 100 Mikrometern. Femtosekundenpulslaser, die auf kurze Kohärenzlängen optimiert wurden, trieben die Axialauflösung bis unter zwei Mikrometer – eine Verbesserung um fast das Zehnfache.

Die Axialauflösung hängt auch von der Bandbreite der Lichtquelle ab: Größere Bandbreite ermöglicht feinere Auflösung. Da SC-Licht nicht nur eine kurze Kohärenzlänge hat, sondern auch eine größere Bandbreite als jeder Femtosekundenlaser, eignet es sich ideal für hochauflösende OCT-Bildgebung. Im Jahr 2002 hat Boris Povazay, der jetzt an der Medizinischen Universität Wien tätig ist, mit Mikrostrukturfasern erzeugtes SC-Licht verwendet, um menschliche Krebszellen mit einer Axialauflösung von 0,5 Mikrometern abzubilden. Zum Vergleich: Eine typische Zelle hat einen Durchmesser von rund zehn Mikrometern.

Das Superkontinuum ist einer der spektakulärsten und elegantesten Effekte der gesamten Optik: Das einfarbige Licht eines intensiven Laserpulses passiert einen Kristall, eine Glasfaser oder ein Gas – und wird strahlend weiß. Doch die SC-Erzeugung ist nicht nur für das bloße Auge eindrucksvoll, sondern ermöglicht die unterschiedlichsten Anwendungen, von der chemischen Sensorik bis zu den präzisesten Zeit- und Frequenzmessungen überhaupt. Auch 35 Jahre nach seiner Entdeckung erstrahlt das Superkontinuum in immer neuem, blendend weißem Licht. ◁

Robert R. Alfano ist Professor für Ingenieurwissenschaft an der City University of New York und leitet dort das Institute for Ultrafast Spectroscopy and Lasers sowie das New York State Center for Advanced Technology in Photonics Applications. Seine Forschungsinteressen umfassen bildgebende Verfahren für die Medizin sowie Biophysik, nichtlineare Optik und Photonik. Alfano hat mehr als 700 Artikel in Fachzeitschriften veröffentlicht und besitzt 94 Patente.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

The supercontinuum laser source: Fundamentals with updated references. Von Robert R. Alfano (Hg.). Springer, New York 2006

Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. Von John M. Dudley et al. in: Reviews of Modern Physics, Bd. 78, S. 1135, 2006

Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses. Von R. R. Alfano und S. L. Shapiro in: Physical Review Letters, Bd. 24, S. 592, 1970

Weblinks zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864272.

wichtige**online**adressen

Datenauswertung und Messtechnik
Sensoren, Verstärker, USB-Messkarten
Messprogramme, Auftragsmessungen
Instrumentierung von Prüfständen
www.alles-messen.de

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,Technische Berechnung, Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Computer aus Biomolekülen

Eine Mischung aus DNA und Enzymen wirkt wie ein vollwertiger Rechner. Dieser molekulare Automat passt in eine lebende Zelle. Dort kann er Stoffe in seiner Umgebung erkennen, aus diesen Erkenntnissen Schlüsse ziehen und danach handeln.

Von Ehud Shapiro
und Yaakov Benenson

Als der britische Mathematiker Alan Turing (1912–1954) sein Konzept einer universell programmierbaren Maschine entwickelte, die heute allgemein »Computer« genannt wird, war ein Computer im allgemeinen Sprachgebrauch noch kein Gerät, sondern ein Mensch. Es war das Jahr 1936, und wer von Beruf Computer war, hatte tagaus, tagein stupide Rechenaufgaben zu bewältigen. Turings Maschine sollte dem Menschen diese Arbeit abnehmen, genauer: alles berechnen können, was überhaupt berechenbar ist. Seine Überlegungen begründeten die Theorie der Berechenbarkeit und daüber hinaus die Wissenschaft vom Computer.

Bemerkenswerterweise hat Turing nie festgelegt, woraus seine Maschine eigentlich bestehen sollte. Von Drähten, Transistoren – die es damals noch nicht gab – oder logischen Gattern war nicht die Rede. Er stellte sich seinen »universellen Computer« sogar weiterhin durchaus als Menschen vor, ausgestattet mit einem unendlich langen Streifen Papier, Bleistift und Radiergummi sowie einem Zettel mit Anweisungen. Dieser unermüdliche Rechenknecht liest ein Symbol auf dem Papier, verändert es je nach den zum Symbol gehörigen Anweisungen, geht zum linken oder rechten Nachbarsymbol über, liest dieses und so weiter, bis die Anweisung »Stopp« seine Tätigkeit beendet.

Man kann auf diese merkwürdige Weise zum Beispiel zwei Zahlen multiplizieren: Zu Beginn der Berechnung stehen die Faktoren binär kodiert auf dem Streifen und am Ende das Produkt. In der Praxis ist das so quälend umständlich, dass niemand auf die Idee käme, auch nur einen Taschenrechner nach dem Prinzip der Turing-Maschine zu bauen. Aber theoretisch kann eine Turing-Maschine alles berechnen, was irgendein Computer berechnen kann. Wer also aus irgendwelchen Zutaten eine Turing-Maschine zusammenbringt, dem steht damit die ganze Welt des Berechenbaren offen – im Prinzip.

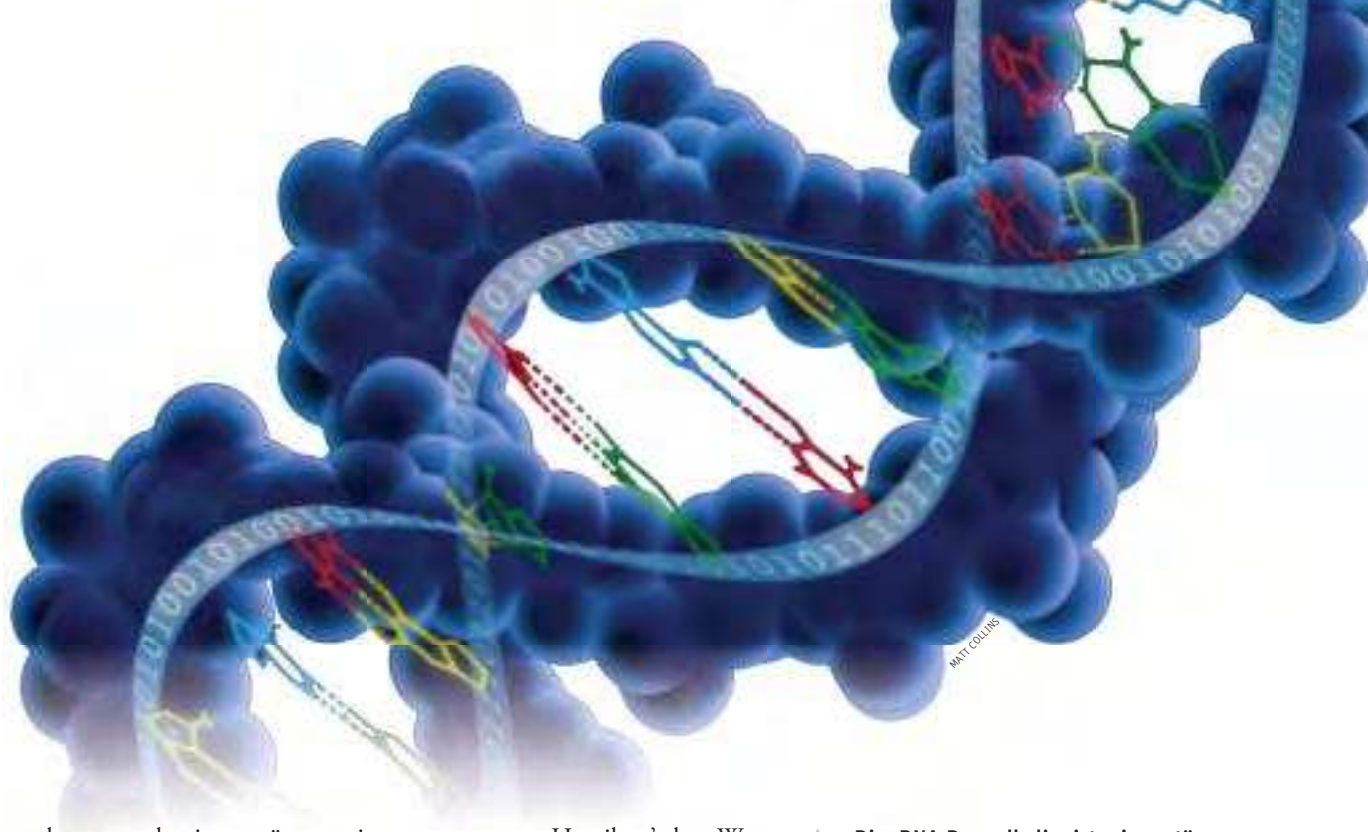
Schritt für Schritt die Kette entlang

Die Welt hat nichtmenschliche Computer praktisch ausschließlich als elektrische Geräte kennen gelernt, mit Relais, Röhren oder heute den allgegenwärtigen Mikrochips. Aber Turings Konzept ist so allgemein, dass auch viele andere Realisierungen denkbar sind. Insbesondere haben die molekularbiologischen Vorgänge im Inneren einer Zelle verblüffende Ähnlichkeiten mit der Arbeitsweise einer Turing-Maschine: Beide Systeme verarbeiten Informationen, die aus Ketten von Symbolen aus einer fest vorgegebenen Menge bestehen (einem »Alphabet«). Sie arbeiten sich Schritt für Schritt durch diese Ketten durch, wobei sie, je nach den vorgegebenen Regeln, Symbole verändern oder hinzufügen.

Also wären Biomoleküle ein geeignetes Rohmaterial für einen Rechner neuen Typs. Ein solcher biologischer Computer würde die klassischen Geräte sicherlich nicht auf deren eigenem Terrain – hohe Rechengeschwindigkeit – übertreffen: Eine natürliche molekulare Maschine wie zum Beispiel ein Ribosom erledigt gerade mal einige hundert elementare Operationen pro Sekunde, während ein moderner Großrechner das Millionenfache schafft. Dafür haben die Moleküle eine einzigartige Fähigkeit: Sie sprechen die Sprache lebender Zellen.

Ein Computer aus Biomolekülen wäre in einer Zelle gleichsam zu Hause. Er würde mit ihr in Wechselwirkung treten, indem er Moleküle erkennt (Input) oder produziert (Output), die dort ohnehin natürlich vorkommen. So könnte er seine Wirtszelle als autonomer automatischer »Hausarzt« unterstützen, indem er Signale aus der Umgebung registriert, die auf eine Krankheit hindeuten, diese mit Hilfe des vorprogrammierten medizinischen Wissens verarbeitet und als Output ein Signal liefert oder ein Medikament verabreicht.

Die letzten sieben Jahre haben wir an der Realisierung dieser Vision gearbeitet. Es ist uns bereits gelungen, einen biologischen Automaten aus DNA und Proteinen herzustellen, der im Reagenzglas ein molekulares Symptom für bestimmte Krebsarten erkennt und diese durch Freisetzung von Medikamenten »therapiert«. Dieser Machbarkeitsnachweis gab uns ungeheuren Auftrieb: zum einen wegen potenzieller Anwendungen in der Medizin, zum anderen, weil dieses Ergebnis



Die DNA-Doppelhelix ist ein natürlicher Datenspeicher – bandförmig, wie eine Turing-Maschine es erfordert.

etwas ganz anderes war, als wir ursprünglich geplant hatten.

Für mich (Shapiro) begann die Forschungsarbeit mit folgender Erkenntnis. Man nehme gewisse elementare Tätigkeiten molekularer Maschinen innerhalb einer Zelle: einen charakteristischen Molekülbaustein erkennen, einen Strang aufschneiden, zwei Teilstränge zusammenfügen, sich entlang einem Strang bewegen. Dann ergibt dieses Sortiment von Operationen eine Turing-Maschine. Genauer: Ein Arbeitsschritt einer Turing-Maschine ist realisierbar durch einmal Erkennen, zweimal Aufschneiden – wodurch das bisherige Symbol aus dem Strang entfernt wird –, zweimal Zusammenfügen – nämlich ein neues Symbol an der Stelle des alten einfügen – und Bewegen nach links oder rechts.

Der IBM-Forscher Charles Bennett hatte als Resultat ähnlicher Gedankengänge bereits 1982 eine hypothetische molekulare Turing-Maschine entworfen. Da es ihm auf den minimal erforderlichen Energiebedarf ankam, dachte er über einen Computer nach, der einen Rechenakt mit einem einzigen Molekül ausführt (siehe »Grundsätzliche physikalische Grenzen beim Rechnen« von Charles H. Bennett und Rolf Landauer, Spektrum der Wissenschaft 9/1985, S. 94).

Den ersten konkreten Beweis für die Rechenfähigkeit der Moleküle lieferte 1994 Leonard Adleman von der Universität von Südkalifornien in Los Angeles. Er löste mit DNA einen sehr einfachen Fall eines notorisch schweren Problems: einen so genannten Hamilton'schen Weg zu finden. Gegeben ist eine Menge von Städten, zwischen denen es Flugverbindungen gibt, aber nicht von jeder Stadt zu jeder; gesucht ist ein Rundweg, der jede Stadt genau einmal besucht. Wie bei seinem besser bekannten Verwandten, dem Problem des Handlungsreisenden, wächst mit zunehmender Anzahl der Städte die Anzahl der Möglichkeiten exponentiell ins Unermessliche, sodass bereits das Durchprobieren mittelgroßer Fluglinniennetze jeden Computer überfordert (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 76).

Rechner aus der Suppe

Adleman stellte jede Stadt und jede Flugverbindung durch einen DNA-Strang dar und gab sie alle in vielen Exemplaren in ein Reagenzglas. Indem die Stränge sich so paarten, wie es einer echten Rundreise entsprach, probierten sie im Effekt sämtliche Möglichkeiten durch und fanden nach nur einer Sekunde auch die richtige (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 70). Nachdem die Hauptsache sehr schnell erledigt war, benötigte Adleman für die Nebensache sehr viel länger: Es war mühsam, das Molekül, das die richtige Lösung darstellte, aus der DNA-Suppe zu extrahieren. So machte er sich auf die Suche nach praktikableren Möglichkeiten.

»Zukünftige Forschung im Bereich der Molekularbiologie könnte verbesserte Techniken zur Handhabung von Makromolekülen liefern«, schrieb Adleman 1994 in einem einflussreichen Fachartikel über sein DNA-Experiment. »Chemische Studien könnten zur Entwicklung synthetischer Designer-Enzyme führen. Es ist vorstellbar, dass sich damit ein Allzweck-Computer bauen lässt, der aus nichts anderem besteht als einem einzigen Makromolekül sowie einer Sammlung ribosomartiger Enzyme, die auf dieses einwirken.«

Ich (Shapiro) setzte mir das Ziel, die logische Funktionsweise eines solchen Molekularrechners detailliert auszuarbeiten – eine Art Bauprinzip, das dann zu den verschiedensten Rechnern zu konkretisieren wäre. Bis 1999 hatte ich ein mechanisches Modell für einen solchen Rechner aus Plastikteilen fertig gestellt (Kasten S. 70). Daraufhin taten wir (Shapiro und Benenson) uns zusammen, um dieses Modell auf Moleküle zu übertragen.

Eine komplett funktionsfähige molekulare Turing-Maschine war für den ersten Versuch dann doch ein etwas zu ehrgeiziges Ziel. Wir begnügten uns zunächst mit einer stark vereinfachten Version, einem so genannten endlichen Automaten (Spektrum der Wissenschaft 3/1984, S. 6). Die Maschine sollte lediglich herausfinden können, ob in einer Kette, die nur Symbole namens *a* oder *b* enthält, die Anzahl der *b*s gerade ist. ▷

▷ Dazu genügt ein endlicher Automat mit nur zwei möglichen Zuständen und vier Übergangsregeln.

Die beiden Zustände kann man »gerade« und »ungerade« nennen. Die Maschine ist im Zustand »gerade«, wenn sie bislang eine gerade Anzahl von *b*s angetroffen hat, entsprechend für »ungerade«. Wenn die Maschine ein *b* antrifft, schaltet sie in den jeweils anderen Zustand; trifft sie ein *a*, lässt sie ihren Zustand unverändert; in jedem Fall geht sie einen Schritt weiter in der Kette. Am Anfang der Berechnung ist sie im Zustand »gerade«; am Ende der Kette angekommen, gibt ihr Zustand Auskunft darüber, ob die Anzahl der *b*s gerade war.

Ich (Benenson) hatte auch schon konkrete Vorstellungen zur Realisierung: Die Symbolkette (der »Input«) sollte ein doppelsträngiges DNA-Molekül sein, die vier Umformungsregeln (die »Software«) kurze, ebenfalls doppelsträngige DNA-Moleküle; die »Hardware«, welche die eigentliche Arbeit macht, sollte aus den natürlichen DNA-verändernden Enzymen *Fok*I und Ligase bestehen. Nur wodurch der aktuelle interne Zustand der Maschine verkörpert werden sollte, war ein großes Problem.

Am Ende gelang uns die Lösung mit einem eleganten Trick. Beim Rechnen frisst die Enzym-Hardware ihren Input gewissermaßen auf, indem sie ein Symbol nach dem anderen abtrennt und dadurch das jeweils folgende dem Angriff der Enzyme aussetzt. Beim Abtrennen kann das Enzym aber mehr oder weniger gierig zubeißen; es gibt also zwei eng benachbarte Stellen, an denen es das Symbol abspalten kann (Kasten S. 71). Damit konnten wir die Information über den Systemzustand in der angefressenen Inputkette selbst unterbringen. Wir mussten nur noch unsere Umformungsmoleküle so bauen, dass jedes ausschließlich in dem Zustand aktiv wird, für den es zuständig ist. Später erfuhren wir, dass Paul Rothemund, ein früherer Schüler Adlemans, auf im Wesentlichen dieselbe Idee gekommen war.

Bemerkenswerterweise mussten wir unseren Computer gar nicht »einschalten«: Sowie wir die Inputmoleküle im Reagenzglas in eine geeignete Pufferlösung mit den Hard- und Softwaremolekülen eingebracht hatten, begann die Berechnung von selbst und lief ohne weiteren Eingriff bis zum Ende durch.

Mehr Leistung durch Weglassen

Beim Test des Systems wurde uns klar, dass unser Gerät im Prinzip noch mehr Probleme lösen konnte. Zu einem endlichen Automaten mit zwei internen Zuständen, der auf einem Alphabet mit zwei Symbolen arbeitet, gibt es insgesamt acht mögliche Übergangsregeln: Zu jeder Kombination von Zustand und aktuellem Symbol kann die Anweisung lauten »Schalte in den anderen Zustand« oder »Tu nichts«. Jede Übergangsregel kann durch ein entsprechendes Molekül realisiert werden. Da ein endlicher Automat durch die Menge seiner Übergangsregeln festgelegt ist, genügt es, das zugehörige Sortiment an Übergangsmolekülen ins Reagenzglas zu schütten.

Es ist natürlich sinnlos, zwei einander widersprechende Regeln zugleich wirken zu lassen; denn dann hängt das Ergebnis der Berechnung davon ab, welches der beiden zugehörigen Enzyme zufällig zuerst den Input anknabbert. Dagegen kann es durchaus sinnvoll sein, für eine gewisse Symbol-Zustands-Kombination gar keine Regel vorzusehen. Dann hält die Berechnung nämlich von allein an, sowie diese Kombination auftritt.

Eine weitere Möglichkeit zur Leistungssteigerung tat sich überraschend beim Austesten auf. Wir ließen systematisch jeweils eine der Substanzen weg, maßen das Verhalten des Systems – und stellten fest, dass das System sogar schneller funktionierte als zuvor, wenn wir die Ligase wegließen! Dieses Enzym hat die Aufgabe, das Softwaremolekül vorübergehend mit dem Inputmolekül zu verbinden, damit das andere Enzym, *Fok*I, beide zusammen erkennen und spalten kann. Wir hatten entdeckt, dass *Fok*I seine Arbeit auch dann tut, wenn die beiden DNA-Stränge nicht miteinander verbunden sind; das war zuvor nicht bekannt.

Dass man auf die Ligase verzichten kann, erspart einem nicht nur die Hälfte des Hardwareaufwands; unter allen Operationen unserer Maschine ist die Aktion der Ligase auch die einzige, die Energie verbraucht. Bei ligasefreiem Betrieb kommt also unser Molekülcomputer ohne zusätzliche Energiezufuhr aus; er lebt von dem Inputstrang, den er im Lauf der Berechnung verzehrt. Zu allem Überfluss bleiben die Softwaremoleküle, wenn sie nicht mit Ligase an den Inputstrang gebunden werden, erhalten und können wiederverwendet werden.

Die Perfektionierung des ligasefreien Systems erforderte mehrere Monate akribischer Arbeit und Datenanalyse. Anfangs arbeitete unsere Maschine sehr un-

In Kürze

▶ **Natürliche molekulare Maschinen** verarbeiten Information in einer Weise, die verblüffende Ähnlichkeiten zur Arbeitsweise einer **Turing-Maschine** aufweist, eines hypothetischen, auf das Einfachste reduzierten Computers.

▶ **Aus DNA und Enzymen** kann man einen Automaten mit Eigenschaften ähnlich einer Turing-Maschine bauen. Er führt Berechnungen aus, nimmt Input in Gestalt anderer biologischer Moleküle entgegen und produziert biologischen Output in Form eines Signals oder eines Medikaments.

zuverlässig und setzte oft nach einem oder zwei Rechenschritten aus. Aber wir nahmen die Herausforderung an, und mit Rat und Hilfe einiger Kollegen fand ich (Benenson) schließlich die Lösung. Kleine, aber wichtige Veränderungen an den verwendeten DNA-Sequenzen machten unsere Maschine verlässlich. Im Jahr 2003 hatten wir einen autonomen, programmierbaren Computer, der als einzige Energiequelle seine Inputmoleküle verwendete (Kasten S. 71). Daher kann er im Prinzip beliebig viele beliebig lange Inputmoleküle verarbeiten, ohne je Energie oder Softwaremoleküle nachtanken zu müssen.

Eine große Leistung – aber ein endlicher Automat ist eben viel schwächer als eine Turing-Maschine. Denn die kann alles, was ein richtiger Computer auch kann, wenn man von oberflächlichen Dingen wie dem Zeitbedarf absieht.

Wir waren ausgezogen, einen Rolls-Royce zu bauen, und hatten immerhin ein recht ordentliches Fahrrad mit Hilfsmotor zu Stande gebracht – ganz nett, aber nichts, womit man sich auf Dauer zufrieden geben möchte. Wir nahmen also unsere ursprünglichen hochgesteckten Ziele wieder in Angriff – und rannten alsbald gegen eine Mauer, an der Adleman schon vor zehn Jahren gescheitert war: Die »Designer-Enzyme«, die wir benötigt hätten, gab es einfach nicht.

Molekularer Hausarzt

Es ist kein Komplex aus natürlich vorkommenden Enzymen bekannt, der das Zerteilen und Zusammenfügen einer Inputkette in koordinierter Weise, an der richtigen Stelle und in der richtigen Reihenfolge durchführen könnte, jedenfalls nicht mit der Flexibilität, die für eine Turing-Maschine erforderlich ist. Es müssten natürliche Enzyme »maßgeschneidert« oder ganz neue synthetische Enzyme hergestellt werden. Da die Wissenschaft das noch nicht anbieten kann, standen wir da mit unserem fertig ausgearbeiteten Bauplan für eine molekularbiologische Turing-Maschine – und warten bis heute darauf, dass die dafür benötigten Bauteile erfunden werden.

Reumütig kehrten wir zu unserem Zwei-Zustands-Automaten zurück und überlegten uns, ob wir nicht eine nützliche Verwendung für ihn finden könnten. Da wir bereits medizinische Anwendungen im Sinn gehabt hatten, dachten wir an ein Gerät für einfache Diagnosen: Es untersucht seine unmittelbare Umgebung und gibt dann Auskunft, ob die Anzeichen einer bestimmten Krankheit vorliegen.

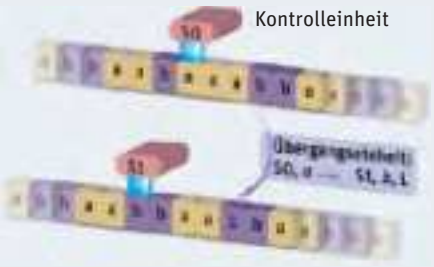
Das ist eine schlichte Ja-Nein-Frage und damit im Prinzip innerhalb der Reichweite eines endlichen Automaten. Der befindet sich anfangs im Zustand »Ja« und überprüft dann der Reihe nach eine gewisse Anzahl von Bedingungen. Wenn eine Bedingung aus der Liste erfüllt ist, bleibt er im Zustand »Ja«, ansonsten geht er in den Zustand »Nein« über und behält diesen für den Rest des Rechenvorgangs bei. Somit lautet die Diagnose nur dann »Ja«, wenn alle Bedingungen erfüllt sind, und »Nein«, wenn auch nur eine Bedingung nicht zutrifft.

Wie aber überprüft der Automat, ob eine bestimmte Bedingung vorliegt? Irgendwie muss die Umgebung die Konzentration der Übergangsmoleküle und damit die Berechnungen beeinflussen. Anders als bei der molekularen Turing- ▷

Elementare Rechenmaschinen – Theorie und Natur

Bereits 1936 entwickelte der Mathematiker Alan Turing das grundlegende Konzept eines mechanischen Computers – lange bevor die molekülgroßen »Maschinen« innerhalb von Zellen bekannt waren. Als später deren Arbeitsweise besser verstanden wurde, erkannte man auffallende Ähnlichkeiten zu Turings Konzept: Beide Systeme speichern Informationen in Ketten von Symbolen; sie verarbeiten diese Symbole eines nach dem anderen; und diese Verarbeitung folgt festgelegten Regeln.

Die hypothetische Turing-Maschine arbeitet mit einem Papierstreifen oder (Magnet-)Band, auf dem Informationen in Form von Symbolen eingetragen sind, etwa *a* und *b*. Eine Kontrolleinheit liest eines dieser Symbole, verändert es entsprechend den Übergangsregeln, die auch vom jeweiligen internen Zustand des Systems abhängen, wandert um eine Position nach rechts oder links, und so weiter. Im obigen Beispiel befindet sich die Kontrolleinheit im internen Zustand S0 und liest ein *a*. Entsprechend der zitierten Übergangsregel geht sie daraufhin in den internen Zustand S1 über, schreibt ein *b* an die Stelle des Bands, an der sie sich gerade befindet, und rückt einen Schritt nach links.



Eine biologische Maschine ist das Ribosom, ein Organell im Inneren einer Zelle. Es liest Informationen von der Boten-RNA (mRNA) ab, die ihrerseits eine Abschrift eines Gens ist, und übersetzt diese in Aminosäure-Sequenzen, aus denen schließlich Proteine werden. Jeder Buchstabe des mRNA-Alphabets (ein »Kodon«) besteht aus drei Nukleotidbausteinen und entspricht einer bestimmten Aminosäure. Das Ribosom verarbeitet den mRNA-Strang Kodon für Kodon. Helfermoleküle, so genannte Transfer-RNAs (tRNA), tragen an einem Ende eine Dreiergruppe, die auf ein bestimmtes Kodon passt, und am anderen Ende die zugehörige Aminosäure. Ein Arbeitsschritt besteht darin, dass die richtige Transfer-DNA sich an das aktuelle Kodon heftet und dabei die Aminosäure freisetzt, die in die wachsende Kette eingebaut wird.

ALLE INFOGRAFIKEN DES ARTIKELS: LUCY READING-IKKANDA

Maschine, wo zu jeder Kombination von Symbol und internem Zustand der Übergang in den neuen Zustand eindeutig bestimmt ist und deswegen auch nur jeweils eine Sorte Übergangsmolekül präsent sein darf, dürfen hier also einander widersprechende Softwaremoleküle und damit Handlungsanweisungen konkurrieren. Bestimmte Umgebungsbedingungen, die für das Vorliegen einer Krankheit sprechen, würden dann die Konzentration einer Sorte Softwaremoleküle zu Lasten der anderen erhöhen, und zwar umso mehr, je stärker das Symptom ausgeprägt ist.

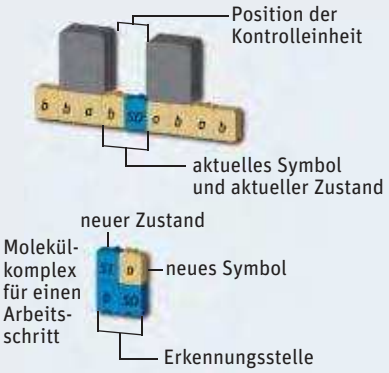
Ein Beispiel: Charakteristisch für viele Krebserkrankungen ist eine ungewöhnlich hohe Konzentrationen eines bestimmten Proteins in der Zelle. Dies wiederum ist das Ergebnis abnormer Aktivität bestimmter Gene, die das von ihnen kodierte Protein in zu großer oder zu geringer Menge herstellen. Der erste Schritt dieser Herstellung ist die Produktion von Boten-RNA (*messenger-RNA*, mRNA) im Zellkern, die dann den Ribosomen zur eigentlichen Proteinsynthese dient. Eine überhöhte Konzentration gewisser mRNA-Stränge ist also ein Indikator für diese Krebserkrankungen.

Ich (Benenson) entwarf ein System, in dem gewisse Übergangsmoleküle mit diesen mRNA-Sequenzen reagieren und dadurch erst aktiv werden (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 23). Das erhöht die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Computer das Symptom als vorliegend erkennt (Kasten S. 72/73). Praktisch ließe sich das System für die Diagnose aller Krankheiten einsetzen, die mit überhöhten Gen-Aktivitäten einhergehen. Außerdem könnte es so angepasst werden, dass es schädliche Mutationen in mRNA-Sequenzen entdeckt.

Nachdem wir sowohl einen Input-Mechanismus hatten, der Krankheitssymptome aufspüren kann, als auch einen logischen Apparat zur Durchführung der Diagnose, lautete die nächste Frage: Was sollte der Computer tun, wenn eine Krankheit diagnostiziert ist? Anfangs erwogen wir, dass er ein sichtbares Signal sendet. Doch in der molekularen Welt liegt zwischen der Erzeu-

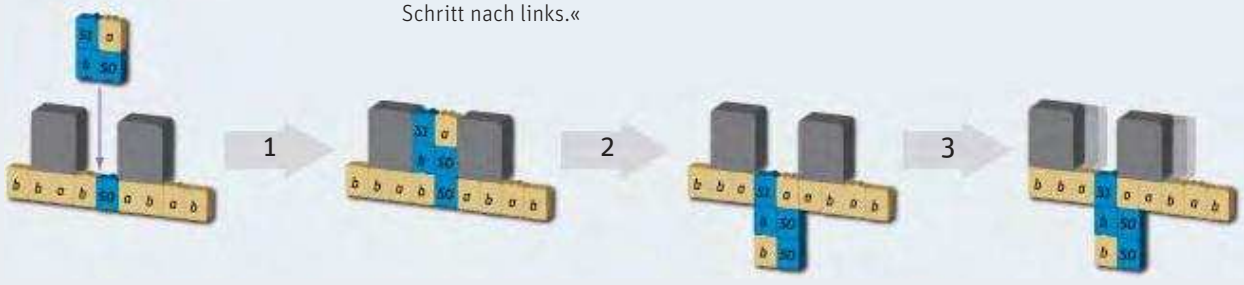
Molekulare Turing-Maschinen – eine Vorstudie aus Plastik

Eine Turing-Maschine aus Biomolekülen würde deren natürliche Fähigkeit nutzen, Symbole zu erkennen und molekulare Untereinheiten zu verbinden oder zu trennen. Ein Kunststoffmodell (rechts), das einer der Autoren baute, dient als Entwurf für ein solches System. Alle Moleküle werden durch Klötzchen dargestellt, die sich durch Vorsprünge oder Kerben an der Außenseite voneinander unterscheiden. Die gelben Molekülklötzchen tragen die Symbole *a* oder *b*. Die blauen »Software«-Moleküle verkörpern den internen Zustand der Maschine sowie die Übergangsregeln.



Die Maschine arbeitet auf einer Kette von Symbolmolekülen. Das aktuelle Symbol und der aktuelle Zustand stecken in den beiden Klötzchen, die zwischen den großen grauen Klötzchen der Kontrolleinheit liegen.

Ein Arbeitsschritt der Maschine wird ausgeführt durch einen Molekülkomplex, der an seiner Unterseite zu einer Kombination aus aktuellem Symbol und aktuellem Zustand passt und an der Oberseite den neuen Zustand und das neue Symbol enthält. Das links gezeigte Beispiel verkörpert die Übergangsregel: »Wenn der aktuelle Zustand SO und das aktuelle Symbol *b* ist, dann ändere den Zustand in S1, das Symbol in *a* und wandere einen Schritt nach links.«



Unter den zahlreichen im »Zellplasma« herumschwimmenden Molekülkomplexen rastet einzig derjenige in die Kontrolleinheit ein, der mit seiner richtig geformten Unterseite zur aktuellen Kombination aus Symbol und internem Zustand passt (1). Der Molekülkomplex bindet sich an die beiden und verdrängt sie aus ihrer bisherigen Position (2). Die Kontrolleinheit wandert, der Übergangsregel folgend, einen Schritt nach links (3), und das Spiel beginnt von Neuem. Das Ganze wiederholt sich, bis sich zu einer Kombination von Symbol und internem Zustand keine Übergangsregel mehr findet.

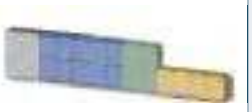
Ein Computer aus Molekülen

Ein molekularer Automat enthält ein Sortiment an DNA-Strängen, die sowohl als Input wie auch als Software dienen können, und das DNA spaltende Enzym *Fok*I als Hardware. Sowohl die Symbole, welche die Maschine verarbeitet, als auch deren interner Zustand werden durch kurze Folgen von Nukleotiden (elementaren DNA-Bausteinen) repräsentiert; diese werden mit A, C, G und T abgekürzt.

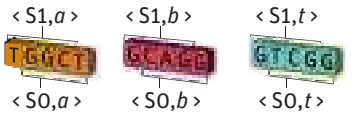
Der hier beschriebene endliche Automat bearbeitet seinen Input-DNA-Strang nur in einer Richtung und liefert am Ende seiner Aktivität eine Antwort auf eine einzige Ja-Nein-Frage.

Hardware:
Das Enzym *Fok*I (grau) erkennt die Nukleotid-Sequenz GGATG (blau) und zerschneidet eine doppelsträngige DNA 9 beziehungsweise 13 Nukleotide hinter dem Erkennungsort.

Software:
Eine Übergangsregel ist eines von acht kurzen doppelsträngigen DNA-Molekülen. Sie enthält den *Fok*I-Erkennungsort (blau), gefolgt von zwei bis sechs als Abstandshalter fungierenden Nukleotidpaaren (grün) und einem einzelsträngigen Ende (gelb), das sich an ein komplementäres Gegenstück in einem Inputmolekül bindet.



Symbol und Zustand:
Im (doppelsträngigen) Input besteht ein Symbol aus fünf Nukleotid-Paaren: braun für *a*, rot für *b* und hellblau für das zusätzliche Symbol *t* (Terminator), welches das Ende des Strangs anzeigt (Bilder oben). Zwei Symbole sind getrennt durch drei Nukleotidpaare, die als Abstandshalter dienen (unten, rosa). Das Enzym *Fok*I lässt von den fünf Nukleotidpaaren eines Symbols nur ein einzelsträngiges Schwänzchen der Länge 4 übrig, und zwar je nachdem, wo es schneidet, die ersten vier oder die letzten vier der ursprünglich fünf Nukleotide (oben). In diesen beiden Möglichkeiten ist der interne Zustand des Systems kodiert.



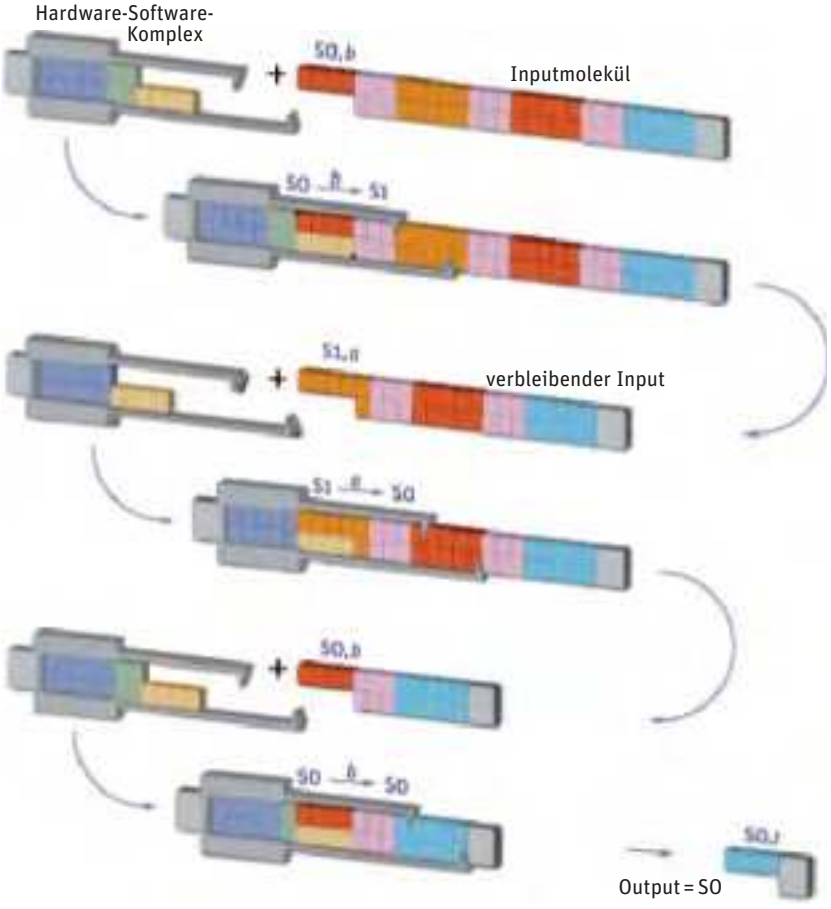
Das Schwänzchen ist »klebrig« *(sticky)*, das heißt, es hat eine große Affinität zu einem gleich langen Einzelstrang mit den komplementären Nukleotiden, wie ihn das zugehörige Übergangsregelmolekül aufweist.

Selbsttätige Arbeit der Maschine:
Ein Hardware-Software-Komplex erkennt seine komplementäre Zustand-Symbol-Kombination im Inputmolekül. Die Moleküle verbinden sich zu einem Hardware-Software-Input-Komplex. Anschließend spaltet *Fok*I das Inputmolekül und legt damit das nächste Symbol frei.

Ein neuer Hardware-Software-Komplex erkennt in dem, was vom Inputmolekül übrig geblieben ist, das nächste Symbol mitsamt dem jetzt aktuellen internen Zustand der Maschine.

Das Spiel geht weiter, bis eine Kombination aus Symbol und Zustand auftritt, auf die keine Regel passt, oder das Ende-Symbol *t* erscheint.

In diesem Beispiel hat die Berechnung von dem ganzen Input nur ein vier Nukleotide langes Terminator-Schwänzchen übrig gelassen, das den Zustand SO anzeigt. Das ist das Endergebnis der Berechnung.



▷ gung eines Signals und dem Verabreichen eines Medikaments nur ein kleiner Schritt. Binyamin Gil, ein Doktorand in unserer Gruppe, entwarf und realisierte einen Mechanismus, der bei positiver Diagnose ein Medikamentenmolekül freisetzt.

Damit war unser Werk noch nicht vollendet. Wir standen vor dem zentralen Problem aller Hardware-Konstrukteure, ein zuverlässiges System aus unzuverlässigen Komponenten zu bauen. Nicht nur biologische, auch elektronische und mechanische Systeme sind umso schwieriger zu beherrschen, je kleiner und zahlreicher ihre Einzelteile sind. In unserem Fall hängt der Rechenvorgang ohnehin vom Zufall ab, und DNA rekombiniert sich nicht so regelmäßig, wie ein Transistor schaltet. Wir mussten mit Fehlern rechnen, das heißt falsch-positiven oder falsch-negativen Diagnosen.

Zum Glück ist zwar das Versagen des einzelnen Automaten nicht vorhersagbar, die Wahrscheinlichkeit seines Versagens aber schon, sodass wir einen Kompensationsmechanismus einrichten konnten. Wir erzeugten zwei Typen von Rechenmolekülen: Das eine setzt wie beschrieben ein Medikament frei, wenn der Rechenvorgang im Zustand »Ja« endet, das andere setzt ein Gegenmittel frei, wenn er im Zustand »Nein« endet. Indem wir das Mengenverhältnis beider Molekültypen geeignet wählten, konnten wir genau bestimmen, ab welchem Gewissheitsniveau das aktive Medikament verabreicht wird.

Soll man das Medikament geben, wenn man sich zu 95 Prozent sicher ist, dass die Krankheit vorliegt, oder schon bei 50 Prozent? Bei Entscheidungen dieser Art muss der Arzt die schädlichen Folgen der Krankheit, die schädlichen Nebenwirkungen des Medikaments und die Unsicherheit der Diagnose gegeneinander abwägen. Ein molekularer Automat »im ärztlichen Auftrag« könnte so programmiert werden, dass er eine ähnliche Abwägung durchführt.

Am Ende hat uns unser Fahrrad viel weiter gebracht, als wir anfangs für möglich hielten – und vor allem in eine ganz andere Richtung. Bislang wurde der Funktionsnachweis unseres molekularen Computers lediglich im Reagenzglas erbracht. Die biologische Umgebung wurde durch Zufügen unterschiedlicher Konzentrationen von RNA- und DNA-Molekülen simuliert; anschließend wurden alle Automaten-Komponenten in dasselbe Reagenzglas eingebracht. Nun geht es darum, den Automaten in einer lebenden Zelle arbeiten zu lassen.

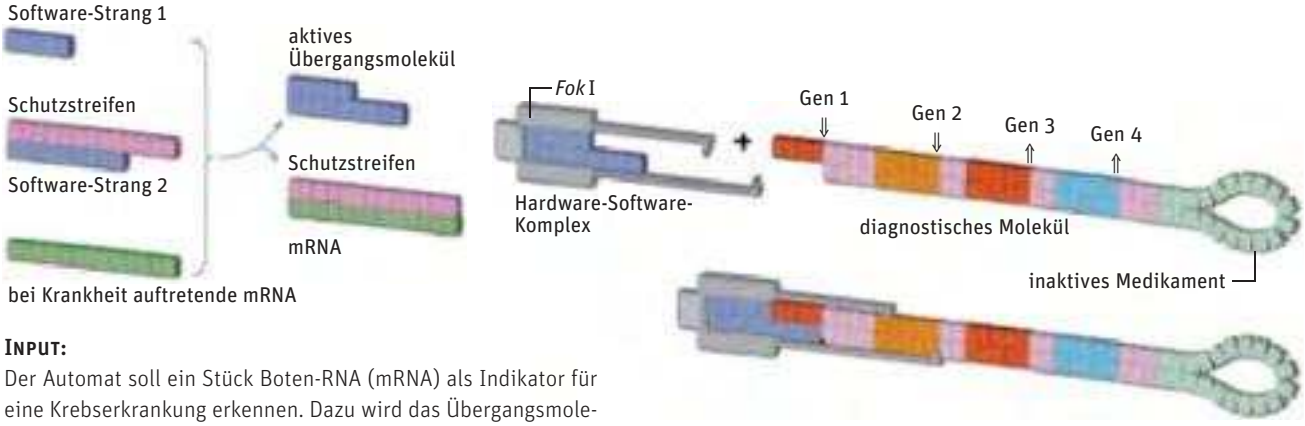
An die Arbeit, Automat!

Schon das Einbringen des Automaten in eine lebende Zelle ist eine Herausforderung, da die meisten molekularen Transport-Systeme für DNA oder Proteine maßgeschneidert sind. Unser Computer enthält beides; wir suchen daher nach ei-

Ein automatischer Hausarzt in jeder Zelle

Nachdem die Autoren gezeigt hatten, dass ein Automat aus DNA und Enzymen eine Ja-Nein-Frage beantworten kann, suchten sie nach einer Frage, die in einer lebenden Zelle zu beantworten von Nutzen ist: Liegen Indikatoren für eine Krankheit vor? Wenn die Antwort Ja ist, setzt der Automat ein Medikament frei.

Das Bauprinzip des Automaten hat sich gegenüber früheren Entwürfen der Autoren nicht wesentlich verändert: Komplexe aus Übergangsmolekülen (»Software«) und Enzymen (»Hardware«) verarbeiten Symbole innerhalb eines Inputmoleküls. Das ist ein DNA-Strang, der hier die Liste der zu überprüfenden Bedingungen



Input:
Der Automat soll ein Stück Boten-RNA (mRNA) als Indikator für eine Krebserkrankung erkennen. Dazu wird das Übergangsmolekül, das den Übergang vom Zustand »Ja« in den Zustand »Ja« vermittelt, nicht wie bisher in der aktiven Form (zweisträngig mit einsträngigem Schwänzchen) ins Reagenzglas eingebracht, sondern als zwei Einzelstränge. Damit diese sich nicht auf der Stelle zum aktiven Molekül vereinigen, ist der eine Strang durch einen einsträngigen »Schutzstreifen« blockiert.

Dieser verlässt jedoch seinen Strang zu Gunsten der die Krankheit anzeigenden mRNA, zu der er eine viel größere Affinität hat – so diese vorhanden ist. Damit sind die Stränge des Übergangsmoleküls frei, sich zum aktiven Molekül zu verbinden.

Berechnung:
Komplexe aus Übergangsmolekül (»Software«) und dem Enzym *Fok*I (»Hardware«) verarbeiten innerhalb des Diagnosemoleküls eine Serie von Symbolen, die Unteraktivität (⇓) oder Überaktivität (⇑) bestimmter Gene repräsentieren. Der Automat beginnt den Rechenvorgang im Zustand »Ja«. Sind alle Krankheitsindikatoren präsent, stellt er eine positive Diagnose. Fehlt eines der Symptome, wechselt der Automat in den Zustand »Nein« und verbleibt darin.

ner Möglichkeit, beide Moleküle gleichzeitig zu übertragen. Weiter müssen wir eine Möglichkeit finden, den Automaten bei seiner Arbeit zu überwachen, um sicherzugehen, dass seine Aktivitäten und die normalen biochemischen Vorgänge in der Zelle einander nicht in die Quere geraten.

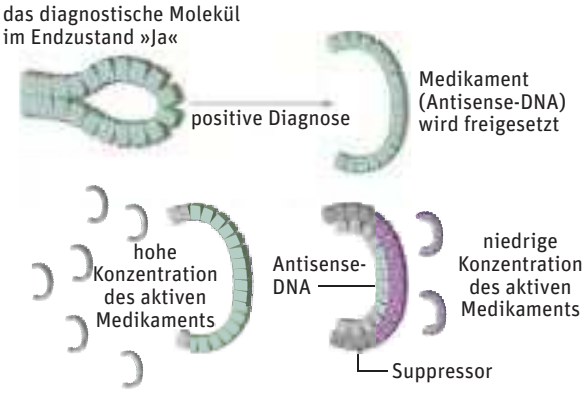
Schließlich untersuchen wir noch andere Verfahren, den Computer mit seiner Umgebung zu koppeln. Den jüngsten Ergebnissen der Krebsforschung zufolge sind Mikro-RNAs, kleine Moleküle in der Zelle mit wichtigen regulierenden Funktionen, bessere Indikatoren für Krebserkrankungen als mRNAs. Wir wollen daher unseren Computer auf die Erkennung von Mikro-RNA umrüsten.

Wir sind zwar noch weit davon entfernt, unseren Computer in lebenden Zellen einzusetzen – geschweige denn in lebenden Organismen –, haben aber immerhin den wichtigen Machbarkeitsnachweis erbracht: Im Reagenzglas haben wir ein biochemisches Krankheitssymptom direkt mit den Rechenschritten eines molekularen Computers gekoppelt. Unsere Experimente bestätigen, dass ein autonomer molekularer Computer mit einem biochemischen System kommunizieren und biologisch sinnvolle Berechnungen anstellen kann. Sein Inputmechanismus kann die Umgebung, in der er arbeitet, sensorisch erfassen; seine Rechenkomponenten können diese Umgebung analysieren, und sein Output-Mechanismus kann die Umgebung auf Grundlage dieser Analyse in intelligenter Weise beeinflussen.

Unser Automat hat daher die Erwartung erfüllt, dass ein molekularbiologischer Computer direkt mit der biochemischen Welt interagieren kann. Außerdem bringt er die Computerwissenschaft in einem großen Bogen zurück zu ihren Wurzeln: der Turing-Maschine. Die ersten Computer mussten von diesem Konzept abweichen, um den Eigenarten ihrer elektronischen Bauteile Rechnung zu tragen. Erst viele Jahrzehnte später, als Biologen die Operationen der kleinen Maschinen in lebenden Zellen zu verstehen begannen, ist Turings abstraktes Konzept wieder zu Ehren gekommen.

Das heißt nicht, dass Moleküle elektronische Maschinen in irgendeiner Form verdrängen könnten. Die beiden Konzepte haben unterschiedliche Stärken und können gut nebeneinander bestehen. Da Biomoleküle direkten Zugriff auf Daten in anderen Biomolekülen haben, sind sie jedoch in natürlicher Weise kompatibel zu lebenden Systemen – in einer Weise, die elektronische Computer nie erreichen können. Wir glauben – und fühlen uns durch unsere Experimente bestätigt –, dass diese neue Computer-Art von fundamentaler Bedeutung ist und sich in einer breiten Palette von Anwendungen als nützlich erweist. Der molekularbiologische Computer ist zum Leben erwacht. ◁

verkörpert. Die Übergangsmoleküle spalten ein Symbol nach dem anderen von dem diagnostischen Molekül ab und legen dabei das jeweils folgende Symbol frei. Neu sind ein Mechanismus, durch den ein Krankheitsindikator als Input auf den Automaten einwirken kann und somit von ihm erkannt wird, sowie ein weiterer Mechanismus, der bei bestätigter Diagnose das Medikament freisetzt.



Output:
Bei einer positiven Diagnose setzt die letzte Spaltung des Diagnosemoleküls das Medikament frei. Es handelt sich um ein einsträngiges Stück so genannter Antisense-DNA (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 68).

Zum Schutz vor Fehldiagnosen erzeugten die Autoren auch eine negative Version des Diagnosemoleküls, die parallel ihre Berechnungen anstellt. Fehlen die Krankheitsindikatoren, setzen diese Automaten ein »Suppressor«-Medikament frei, einen DNA-Strang, der zu dem Medikament komplementär ist, sich an es bindet und es dadurch neutralisiert. Wenn tausende Diagnosemoleküle beider Arten gleichzeitig arbeiten, wird die Mehrheit die richtige Diagnose stellen. Da deren Produkte in der Überzahl sind, wird eine entsprechende Anzahl von ihnen nicht neutralisiert und entfaltet ihre Wirkung.

Ehud Shapiro und **Yaakov Benenson** arbeiten seit 1999 zusammen an molekularen Automaten. Shapiro ist Professor in den Fachbereichen Informatik und Biochemie am Weizmann-Institut in Rehovot (Israel). Als er 1998 den ersten Entwurf einer molekularen Turing-Maschine skizzierte, hatte er schon Karriere als Software-Wissenschaftler gemacht. Im folgenden Jahr wurde Benenson, nach seinem Master-Abschluss in Biochemie am Technion in Haifa, Shapiros Doktorand. Inzwischen arbeitet er am Bauer-Zentrum für Genforschung der Harvard-Universität an neuen molekularen Geräten, die in lebenden Zellen ihre Wirkung entfalten sollen.

Autoren und Literaturhinweise

An autonomous molecular computer for logical control of gene expression. Von Y. Benenson, B. Gil, U. Ben-Dor, R. Adar und E. Shapiro in: Nature, Bd. 429, S. 423, 27. Mai 2004

Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules. Von Y. Benenson, T. Paz-Elizur, R. Adar, E. Keinan, Z. Livneh und E. Shapiro in: Nature, Bd. 414, S. 430, 22. November 2001

A mechanical Turing machine: blueprint for a molecular computer. Von Ehud Shapiro. Vortrag auf dem 5th international meeting on DNA based computers, MIT, 14.–15. Juni 1999. http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~udi/DNA5/

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864275.

ALLE KUNSTWERKE UND DEREN FOTOS: MARA HASELTINE

Die Schönheit der Moleküle

Eine Bildhauerin entdeckt den figurativen Reiz subzellulärer Strukturen.

Von Gerhard Trageser

Gewöhnlich gelten Kunst und Wissenschaft als einander wesensfremd, ja geradezu als sich ausschließendes Gegensatzpaar. Im einen Fall steht der scharfe analytische Verstand im Vordergrund, im anderen die frei schweifende kreative Fantasie. Wissenschaft ergründet die Welt gewöhnlich in einer sachlich-nüchternen Weise, und ihre Ergebnisse haben oft Formelcharakter, die Kunst dagegen erschafft reich ausgeschmückte Scheinwelten, welche die Wirklichkeit nur mehr oder weniger verfremdet widerspiegeln.

Versuche einer Synthese der beiden Reiche haben deshalb Seltenheitswert. Umso bemerkenswerter ist es, dass sich seit einiger Zeit die 33-jährige New Yorker Künstlerin Mara G. Haseltine von neuesten Ergebnissen der biomedizinischen Forschung zu ihren Werken inspirieren lässt. Dabei setzt sie submikroskopische Strukturen in meterhohe Großplastiken aus Schaumstoff, Glas und Metall um.

Sicher kommt es nicht von ungefähr, dass gerade diese Künstlerin sich dem Brückenschlag zwischen Molekularbiologie und Bildhauerei verschrieben hat; immerhin ist ihr Vater der weltbekannte biomedizinische Forscher William A. Haseltine, der mit seiner Arbeitsgruppe unter anderem das Erbgut des Aidserregers HIV entziffert hat, über fünfzig Patente hält und Mitbegründer von mehr als zwanzig Biotechnologie-Firmen ist. Von ihm sind auch in dieser Zeitschrift schon drei Artikel erschienen.

Aufsehen erregte seine Tochter, die in Oberlin (Ohio) und San Francisco (Kalifornien) Atelierkunst, Kunstgeschichte und Bildhauerei studiert hat, erstmals vor vier Jahren mit der 25 Meter langen und bis zu 5 Meter hohen Installation »Walzer der Polypeptide«, welche die Entstehung eines Proteins darstellt. Zentrales Element ist der lange Strang der Boten-RNA: einer Abschrift des Gens für das betreffende Protein, die dessen Bauanleitung enthält. An ihm bewegen sich die Ribosomen entlang, lesen dabei die Anleitung ab und hängen entsprechend Aminosäuren an die wachsende Eiweißkette, die aus dem Ribosom hervorquillt. Je weiter sich dieses vom Anfang des RNA-Fadens vorgearbeitet hat, desto weiter ist die Proteinsynthese gediehen und desto länger erscheint das herausragende, verknäulte Kettenstück. ▷

Die Künstlerin und ihr Werk: Im »Walzer der Polypeptide« erzeugen Ribosomen am RNA-Strang das Protein BlyS, das bei der Immunabwehr hilft

▷ Am Ende der Skulptur steht das fertige Eiweißmolekül. In diesem Fall handelt es sich um das B-Lymphozyten-Stimulatorprotein (BlyS), das die Produktion von Antikörpern gegen Krankheitserreger ankurbelt. Seine Entdeckung im Jahr 1999 ermöglichte neue Ansätze zur Behandlung eines breiten Spektrums von Krankheiten – von Aids über rheumatoide Arthritis bis zu Blutkrebs.

Zur Herstellung dieser und anderer Plastiken nutzte die Künstlerin modernste Methoden wie das Fräsen mit fünf Achsen und Rapid Prototyping. Zunächst wurden Daten bildgebender Verfahren wie der Elektronenmikroskopie und der Kernmagnetresonanz in ein dreidimensionales Computermodell der Skulptur umgesetzt. Zur Steuerung der Fräsmaschine dienten dann Verfahren des Computer-aided Manufacturing.

Von BlyS ist nur das Protein-Rückgrat als Bandmodell dargestellt; auf die Seitenketten wurde aus ästhetischen und konzeptionellen Gründen verzichtet. Stattdessen berücksichtigt die Skulptur die Ergebnisse von Moleküldynamik-Simulationen, die zeigen, welche Abschnitte der Kette stetig vibrieren. Diese Bereiche sind in Schwingungsrichtung verbreitert.

Neben ihrem wissenschaftlichen Informationsgehalt hat die Plastik zweifellos einen hohen ästhetischen Reiz. Obwohl sich die Formen strikt an natürliche Vorbilder anlehnen, wirken sie wie abstrakte Figuren, eingefroren in der Bewegung eines schwungvollen Tanzes. In Anlehnung an Zen-Gärten ist die Skulptur als Teil einer Landschaft konzipiert, in die sie sich harmonisch einfügt.

Dabei spiegelt die mit glänzenden Materialien wie Autolack und Gold beschichtete Oberfläche die Umgebung im Wechsel der Tageszeiten und Lichtverhältnisse vielfältig wider. Indem der Betrachter an der Installation entlangwandert, taucht er wie verzaubert in die submikroskopische Welt in den Zellen unseres Körpers ein und kann auf ebenso sinnliche wie plastische Weise den Ablauf eines elementaren Lebensprozesses nachvollziehen.

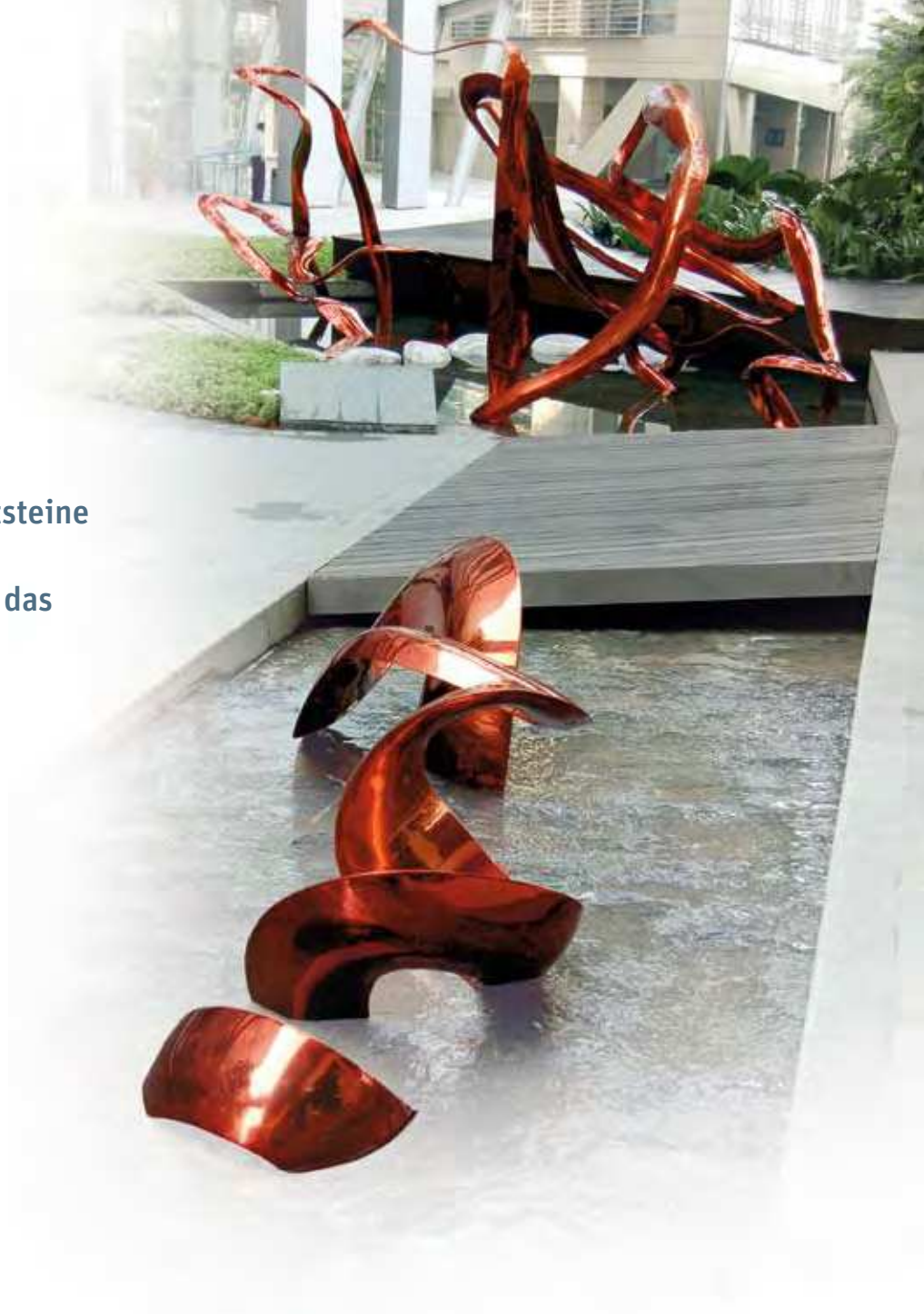
Die zweite Großplastik von Mara Haseltine namens »Sars blockiert« ist begehbar und bindet den Betrachter damit noch stärker ein. Sie bezieht sich auf das Schwere Akute Respiratorische Syndrom (Sars), das im Frühjahr 2003 eine weltweite Epidemie auszulösen drohte. Damals gelang es binnen Kurzem, den Erreger als Coronavirus zu identifizieren und sein Erbgut zu entziffern. Außerdem konnte eine Arbeitsgruppe um Rolf Hilgenfeld vom Institut für Biochemie an der Universität Lübeck die Struktur eines zentralen Proteins ermitteln, das der Schädling zur Ausbreitung braucht. Es handelt sich um eine Protease, die den aus dem Virusgenom zunächst erzeugten langen Proteinstrang in funktionelle Einheiten zerschneidet.

Hilgenfeld und seine Mitarbeiter schlugen anhand der Proteasestruktur ein Hexapeptid als Hemmstoff vor, der sich an das aktive Zentrum des Enzyms anlagert und es so blockiert. Mara Haseltine hat mit ihrer zwei Meter hohen, vier Meter langen und 2,5 Meter breiten Skulptur aus polierter, rötlicher Bronze und Stein, die sich aus einem Teich erhebt, diese Situation eingefangen. Das aktive Zentrum des Enzyms erscheint als Öffnung im Bandmodell des Proteinrückgrats, die einen Durchgang bildet. Die sechs Trittsteine im Wasser repräsentieren dabei den aus sechs Einheiten bestehenden Inhibitor, wie er sich in diese Bindungstasche einfügt.

Im kunstvoll komponierten Bandmodell des Proteins BlyS symbolisieren Verbreiterungen die interne Molekülbewegung

Die letzten September enthüllte Skulptur steht im biomedizinischen Zentrum »Biopolis« in Singapur und würdigt damit den Beitrag der dortigen Forscher im Kampf gegen Sars. Auch sie ist harmonisch in die Umgebung eingepasst: eine parkartig gestaltete Plaza mit Teich in der Mitte. Der »Walzer der Polypeptide« wurde nach mehreren Stationen nun am Cold Spring Harbour Laboratory auf Long Island aufgestellt, einem privaten biomedizinischen Forschungszentrum, dem unter anderem James Watson, der Mitentdecker der DNA-Helix, angehört.

Mara Haseltine hat weitere große Pläne. Am 4. Juli, dem amerikanischen Unabhängigkeitstag, soll auf dem Gelände des Muckenthaler Cultural Center in Fullerton (Kalifornien) ihr Mitochondrion-Brunnen eingeweiht werden. Er ist solargetrieben und besteht komplett aus Recycling-Material: Ehemalige Plastikflaschen bilden die äußere Doppelmembran und Glasperlen die »Christae«: gefaltete innere Membranen des Kraftwerks der Zelle.



»Sars blockiert«: Sechs Trittsteine in der Proteinplastik stehen für ein Hexapeptid, welches das Sars-Virus lahmlegt

Ein weiteres ehrgeiziges Projekt, an dem die Künstlerin schon seit mehr als vier Jahren arbeitet, ist ihr »Zellgarten«: eine fußballfeldgroße Installation, die einen Querschnitt durch eine Zelle mit allen Organellen repräsentiert. Besucher können so im Inneren des Grundbausteins aller Lebewesen umherwandern, die Strukturen dort kennen lernen und eine Ahnung von den Abläufen erhalten.

Alle diese Skulpturen und Arrangements sind in hohem Maße lehrreich. Zugleich aber befriedigen sie unseren Schönheitssinn und bereiten ein visuelles Vergnügen. Dadurch sprechen sie auch Menschen an, die kein spezielles Interesse an der Wissenschaft haben. Einem jeden Betrachter aber öffnen sie die Augen für eine Welt, die in ihrer Winzigkeit sonst nicht erfahrbar ist und nun unweigerlich Staunen erweckt. Insofern ist es eine neue Dimension der Wahrnehmung, die Mara Haseltine mit ihrer künstlerischen Umsetzung von Erkenntnissen der modernen Biologie erschließt. ◁

Gerhard Trageser ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Coronavirus main protease structure: basis for design of Anti-SARS-Drugs. Von Kanchan Anand et al. in: Science, Bd. 300, S. 1763, 13. 6. 2003

The crystal structures of SARS virus main protease and its complex with an inhibitor. Von H. Yang et al. in: PNAS, Bd. 100, S. 13191, 11. 11. 2003

Structural basis of BlyS receptor recognition. Von D. A. Oren et al. in: Nature Structural Biology, Bd. 9, S. 288, April 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864279.

ROBERT BOSCH STIFTUNG

Ein Hauch von Universität im Klassenzimmer

»Geisteswissenschaften in die Schulen« ist das Motto der Initiative »Denkwerk« der Robert Bosch Stiftung. Die ersten Projekte sind schon erfolgreich gemeistert.

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Von Emanuela Buyer

Es gibt in den geisteswissenschaftlichen Fächern weitaus mehr Studenten, als der mit Pädagogen, Philosophen oder Psychologen überlastete Arbeitsmarkt aufnehmen kann. Noch mehr Jugendliche für dieses Fach zu begeistern mutet – bei aller Hochschätzung für die deutschen Dichter und Denker – auf den ersten Blick nicht besonders sinnvoll an.

Genau dieses Ziel scheint jedoch die Robert Bosch Stiftung mit ihrer Initiative »Denkwerk« zu verfolgen. In elf Projekten gewähren Fachbereiche unterschiedlicher Universitäten Schülern Einblick in ihre Forscherwelt, darunter das Institut für Ethnologie der Universität Hamburg, das Historische Institut der Fernuniversität Hagen, das Seminar für Mittlere und Neuere Kirchengeschichte der Universität Münster und das Germanistische Institut der Technischen Hochschule Aachen.

Eine genaue Betrachtung zeigt, dass, gerade was die Geisteswissenschaften angeht, eine Menge Aufklärungsbedarf besteht. Zum einen ist es im Interesse der Universitäten, die Schüler anzulocken, die noch gar nicht wissen, dass sie sich für Philosophie, Musikwissenschaft, Linguistik, Kunstgeschichte oder Ähnliches begeistern können. Zum anderen erscheint es angesichts der hohen Zahl von Studienabbrechern in diesen Fächern geboten, diejenigen, die sich falsche Vorstellungen machen, rechtzeitig auf andere Gedanken zu bringen.

In den Naturwissenschaften fördert die Robert Bosch Stiftung solch eine Informationspolitik schon seit einer ganzen Weile. »Networking MINT«, nur eines von zahlreichen Programmen, erlaubt den Schülern, temporär ins Universitätsleben einzutauchen. Die Initiative Denkwerk soll dies nun für die Geisteswissenschaften leisten.

»Wir haben Erstsemester im Studiengang Kunstgeschichte, die denken, sie dürften jetzt malen!«, wundert sich Karin Kranhold, eine der Organisatorinnen von »Bildung durch Bilder«, eine Initiative des Instituts für Kunstgeschichte der Freien Universität Berlin.

Dem Projektleiter Klaus Krüger und seinen Mitarbeitern geht es um einen doppelten Lerneffekt: Zum einen versuchen sie, die Medienkompetenz der Schüler aufzubauen und sie zum Hinterfragen des Gesehenen zu bewegen. Auffällig findet Kranhold zum Beispiel, dass Schüler ein gemaltes Bild in einem Geschichtsbuch zunächst ebenso für die objektive Wiedergabe der Wirklichkeit halten wie eine Fotografie, ohne sich darüber im Klaren zu sein, dass die Objektivität beispielsweise bei einem gemalten Porträt Napoleons zweifellos noch um vieles fraglicher ist. Zum anderen vermitteln die Wissenschaftler den Jugendlichen die Fähigkeit, an so unterschiedliche Themen wie Mittelalter, Musikvideo, Rembrandt und Herrschaftsrepräsentationen in der Architektur mit universitären Methoden heranzugehen, und zeigen ihnen so, was ein Studium der Kunstgeschichte überhaupt bedeutet.

> »Wir haben Erstsemester im Studiengang Kunstgeschichte, die denken, sie dürften jetzt malen!«

Im Rahmen dieses Projekts arbeiten die Berliner Kunsthistoriker mit elf Schulen der näheren Umgebung zusammen, im Unterricht, in Arbeitsgemeinschaften in der Freizeit oder bei Projekttagen. Professoren und Studenten, Lehrer und Schüler von der Sache zu überzeugen und auch noch geeignete Termine zu finden erweist sich dabei als mühsam.

Beim ersten Denkwerk-Symposium der Stiftung, Mitte November in Berlin, stellten die Beteiligten die ersten laufenden und teilweise auch schon abgeschlossenen Projekte vor. Dabei präsentierten nicht nur die Mitarbeiter der Universitäten und Schulen ihre Ideen und Erfolge an Informationsständen, auch die Jugendlichen selbst hielten ganz stolz und ziemlich selbstbewusst Vorträge über ihre Arbeiten. Die Aufregung, vor so einer großen Gruppe von Lehrern, Doktoren und Professoren zu sprechen, war ihnen kaum anzumerken.

Dass Geschichte mehr sein kann als trockene Texte und auswendig zu lernende Jahreszahlen, durften 15 Schüler des Markgraf-Albrecht-Gymnasiums in Osterburg (Sachsen-Anhalt) erleben, als sie einen ganz anderen Zugang zur Vergangenheit ihrer Region und insbesondere der Langobarden bekamen. Auf einer 30 Kilometer entfernt gelegenen Urnengrabstätte bei Zethlingen gruben sie selbstständig archäologische Kostbarkeiten aus, kartografierten auf professionelle

ROBERT BOSCH STIFTUNG, FOTO: FRANK WELKE

Weise die Grabungsstätte und nutzten ihr künstlerisches Talent, um die gefundenen Schätze zeichnerisch festzuhalten.

Um das Projekt in Gang zu setzen, hatte der Geschichtslehrer Volker Schütte seine Beziehungen zur Universität Magdeburg aufleben lassen. Stolz stellen nun seine Schützlinge ihre Funde und Entdeckungen aus: eine Speerspitze, Gewandschließen, genannt Fibeln, und sogar das Gefäß, in dem die Anverwandten die Überreste des Toten begraben hatten.

Mit Fragebögen durch die Straßen, die Dönerläden und die eigenen Klassenzimmer: Marie-Krystin Borchers und Judith Hannemann stellen die Ergebnisse ihres ethnologischen Projekts vor.

Grabungsarchäologie ist nicht Umgraben

Diese hatten sie schwer erarbeitet: Nach einer theoretischen Auseinandersetzung mit der Kultur des ostgermanischen Stamms bekamen die Schüler zunächst noch eine Einführung in die Kunst des Ausgrabens. Denn mit Spaten und viel Kraft ist noch lange nichts gefunden; vielmehr muss man vorher wissen, wonach man sucht, so brachte ihnen Ausgrabungsleiter Lothar Mittag bei, und entsprechend vorsichtig vorgehen. Getreu dieser Vorgabe entfernten die Jungarchäologen in zwei mal drei Tagen geduldiger Arbeit die Grasnarbe und schälten mit viel Gefühl Schicht für Schicht des Erdreichs ab, bis die ersten verdächtigen Scherben aus dem Boden ragten.

Dann schalteten sie noch einen Gang zurück und machten sich mit Pinseln ans Werk, die Gegenstände freizulegen. Doch erst an der zweiten Grabungsstätte hatten sie Erfolg und konnten die Urne bergen, die sie so dringend finden wollten.

In nächster Zeit werden die Entdecker gemeinsam eine Publikation verfassen, in der sie, wie sich das in der Wissenschaft gehört, ihre Ergebnisse festhalten. »Wir werden unser Projekt dokumentieren«, so der engagierte Lehrer, »und wir haben auch ein paar ganz kleine neue Erkenntnisse, wie der Vergleich unserer Entdeckungen mit der Literatur erbrachte.«

Was motiviert die Universitäten, sich solchermaßen zu engagieren? Die Projekte bieten nicht nur eine Möglichkeit für Schüler, einmal über den Tellerrand zu blicken, auch die Studenten profitieren. Ihr Engagement verschafft vor allem den zukünftigen Lehrkräften oder Pädagogen Gelegenheit, den Ernstfall zu üben. So erwerben sie organisatorische Fähigkeiten über die Projektbegleitung und Unterrichtspraxis über Seminare für Schüler und Lehreinheiten für die Jüngeren.

Schüler können dann für ein Fach Interesse aufbringen, das unter den Erwachsenen ein Schattendasein führt. »Junge Menschen haben offene Ohren für Neues, und darum können wir sie für die Neue Musik begeistern«, erklärt Raphael Woebs vom Institut Denkunternehmung, einer freien »Forschungsinitiative für Musik- und Kulturwissenschaften« in Bamberg und Bayreuth. Je jünger die Schüler, desto toleranter sind sie. Und darum versuchen die Organisatoren auch schon die unteren Gymnasialklassen an die ungewöhnlich klingenden Kunstwerke heranzuführen. ▷

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Ein starker
Jahrgang ...

... ist die **CD-ROM 2006 von Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) der Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft des vergangenen Jahres im PDF-Format. Die Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich auch ausdrucken.
Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat-Reader wird mitgeliefert).

Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit über 10 000 Artikeln. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche in Spektrum ab der Erstausgabe 1978.
spektrumdirekt und das Suchregister laufen nur unter Windows.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

Erscheinungstermin: ca. Ende März 2007.

Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Leserservice | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg
Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751
service@spektrum.com

BEIDE FOTOS: EMANUELA BUYER

Reste einer eisernen Lanzenspitze (oben) und eine Fibel waren unter den Schätzen, welche die Jungarchäologen aus der Urnengrabstätte bei Zethlingen (Sachsen-Anhalt) zu Tage förderten.

▷ Dazu organisierten Studenten zunächst eher konventionelle Unterrichtseinheiten für die Kleinen, in denen sie erste Eindrücke vermittelten.

Die Großen aus der Oberstufe jedoch hielt es nicht im Klassenzimmer, sie zogen aus, ihr Wissen zu verbreiten. Nach ausführlichen Studien von Partituren und Stilrichtungen durften sie ihre Erkenntnisse und Einblicke beim Stuttgarter World New Music Festival 2006 weitergeben, indem sie das Publikum vor den Konzerten in die fremde Welt der Atonalität und der thematisierten Strukturen einführten.

Weit näher am täglichen Leben ist das Projekt »Familie in der Diaspora«. Angeleitet vom Fachbereich Ethnologie der Universität Hamburg, stürzten sich interessierte Jugendliche in eine empirische Studie über das Leben und die Kultur ihrer türkischen und russischen Mitbürger. Mit Fragebögen und Mikrofonen zogen sie durch die Straßen, in die Dönerläden und, natürlich, in die Klassenzimmer ihrer eigenen Schule, um Wissenswertes über diese sozialen Gruppen zu erfahren.

Die Themen hatten die Organisatoren in Hinsicht auf die Relevanz für die Jugendlichen ausgesucht, immerhin teilen sie und ihre ausländischen Mitschüler den Alltag. Ethnologie ist in diesem Fall aktive Integration: Sie ermöglicht Neugierigen einen methodischen Einblick in die Lebensweise und Traditionen in anderen Kulturen.

Das Ergebnis entsprach zum großen Teil den vorher niedergeschriebenen Erwartungen, meinten die vier Referentinnen bei der Vorstellung ihres Projektes. Offensichtlich kennen sich die Schüler gegenseitig doch ziemlich gut. Das wichtigste Fest der türkischen Befragten ist der Ramadan, die traditionelle Fastenzeit der Muslime, während der sie nur nach Sonnenuntergang essen und trinken dürfen. Die Erziehung ist den Untersuchungen der Schülerinnen zufolge noch recht stark von traditionellen Normen und Werten geprägt.

»Das Subjekt der Geschichte«

Ein häufiges Problem der Jugendlichen sei das schlechte Deutsch der Eltern. Aus diesem Grund könnten diese trotz guten Willens ihren Kindern nur mangelhafte Sprachkenntnisse mit auf den Weg geben. Doch auch in der Sprache der alten Heimat fühlten die Jungen sich nicht ausreichend sicher, sodass sie letztlich in keiner wirklich redegewandt seien.

Dieses Problem hat der Kleinkünstler Timo Brunke sicher nicht. In seinem erfrischenden Rahmenprogramm gab er mit viel Wortwitz und Humor einen Vorgeschmack darauf, was für ein gewisser typischer Sprachwandel bei den begeisterten Schülern zu befürchten sein wird, sollten diese sich entscheiden, eine der vielen Geisteswissenschaften zu studieren:

»Ich wollte ja sagen: ›ich‹

Stattdessen rief ich: ›Das Subjekt der Geschichte‹.

Ich wollte sagen: ›Es geht mir gut‹

Stattdessen sprach ich: ›Als mit freiem Willen begabtes Individuum habe ich mich selbst positiv konstituiert‹ …« ◁

Emanuela Buyer hat Physik studiert und ist derzeit Referendarin in Singen.

Förderprogramm Denkwerk

Schüler, Lehrer und Geisteswissenschaftler vernetzen sich

Die Robert Bosch Stiftung fördert im Rahmen des Programms »Denkwerk« Partnerschaften zwischen Wissenschaftlern, Lehrern und Schülern sowie möglicherweise weiteren Institutionen, die gemeinsame Projekte in einer Region durchführen möchten.

Ziel ist es, das Potenzial der geisteswissenschaftlichen Disziplinen für die Vermittlung grundlegender Kompetenzen wie zum Beispiel das Sammeln, Ordnen und Bewerten von Informationen oder das sachkundige Argumentieren auch für die Schule zu nutzen. Darüber hinaus sollen Schüler Gelegenheit haben, die Tätigkeit von Geisteswissenschaftlern auch jenseits des üblichen schulischen Fächerkanons kennen zu lernen.

Durch aktive Mitwirkung an kleineren Projekten lernen Schüler Fragestellungen und Methoden dieser Wissenschaften kennen und können sich auf dieser Grundlage gut informiert für – oder gegen – ein entsprechendes Studium entscheiden.

Das Programm richtet sich an Geistes- und Sozialwissenschaftler aller Fachrichtungen an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen sowie an Lehrer und Schüler ab der 5. Klasse an Gymnasien, Gesamt- und Realschulen.

Anträge von Wissenschaftlern, deren Fach kein direktes Pendant im Kanon der üblichen Schulfächer aufweist, sind besonders willkommen.

Einsendeschluss für Förderungsanträge ist jeweils der 30. April und der 30. Oktober eines Jahres.

Robert Bosch Stiftung GmbH
Heidehofstraße 31
70184 Stuttgart
Telefon: 0711 46084-63
Telefax: 0711 46084-1063
E-Mail: atje.drexler@bosch-stiftung.de
www.bosch-stiftung.de/denkwerk

Ursprünge der griechischen Sternbilder

Auf geschickte Weise interpretiert, verraten antike Schriftquellen, wann und wo die klassischen Sternbilder entstanden. Außerdem erfahren wir daraus, wie sich im Altertum der Blick auf den Nachthimmel wandelte.

Von Bradley E. Schaefer

Als ich ein kleiner Junge war, erklärte mir mein Großvater den Sternhimmel, wobei er mit dem Großer Bären begann. Allein mit einem alten Feldstecher ausgerüstet, begann ich anschließend, im dunklen, weiten Himmel über Colorado andere Sternbilder aufzusuchen – und neue zu erfinden. Damals machte ich mir keine Gedanken über das Alter der überlieferten Sternbilder. Doch heute weiß ich, dass sich hinter dem Ursprung dieser seltsamen Formationen am Himmel ein faszinierendes wissenschaftliches Rätsel verbirgt.

Als die Internationale Astronomische Union im Jahr 1922 offiziell die Namen und Grenzen der 88 Sternbilder des Himmels festlegte, bezog sie sich in den meisten Fällen auf den »Almagest«, das um das Jahr 128 n. Chr. verfasste astronomische Hauptwerk des Klaudios Ptolemaios (auch Claudius Ptolemäus). Dieser griechische Gelehrte führte darin die in seinem Kulturraum populären Sternbilder auf, wobei wiederum die »Phainomena« des Aratos von Soli seine wichtigste Quelle war, ein astronomisch-meteorologisches Lehrgedicht aus dem 4. Jahrhundert v. Chr. Als der große Astronom Hipparch um das Jahr 147 n. Chr. einen Kommentar zu diesem Werk schrieb, behauptete er darin, Aratos hätte vieles in seinem Gedicht aus einem bereits in der Antike verschollenen Werk des Astronomen Eudoxos übernommen.

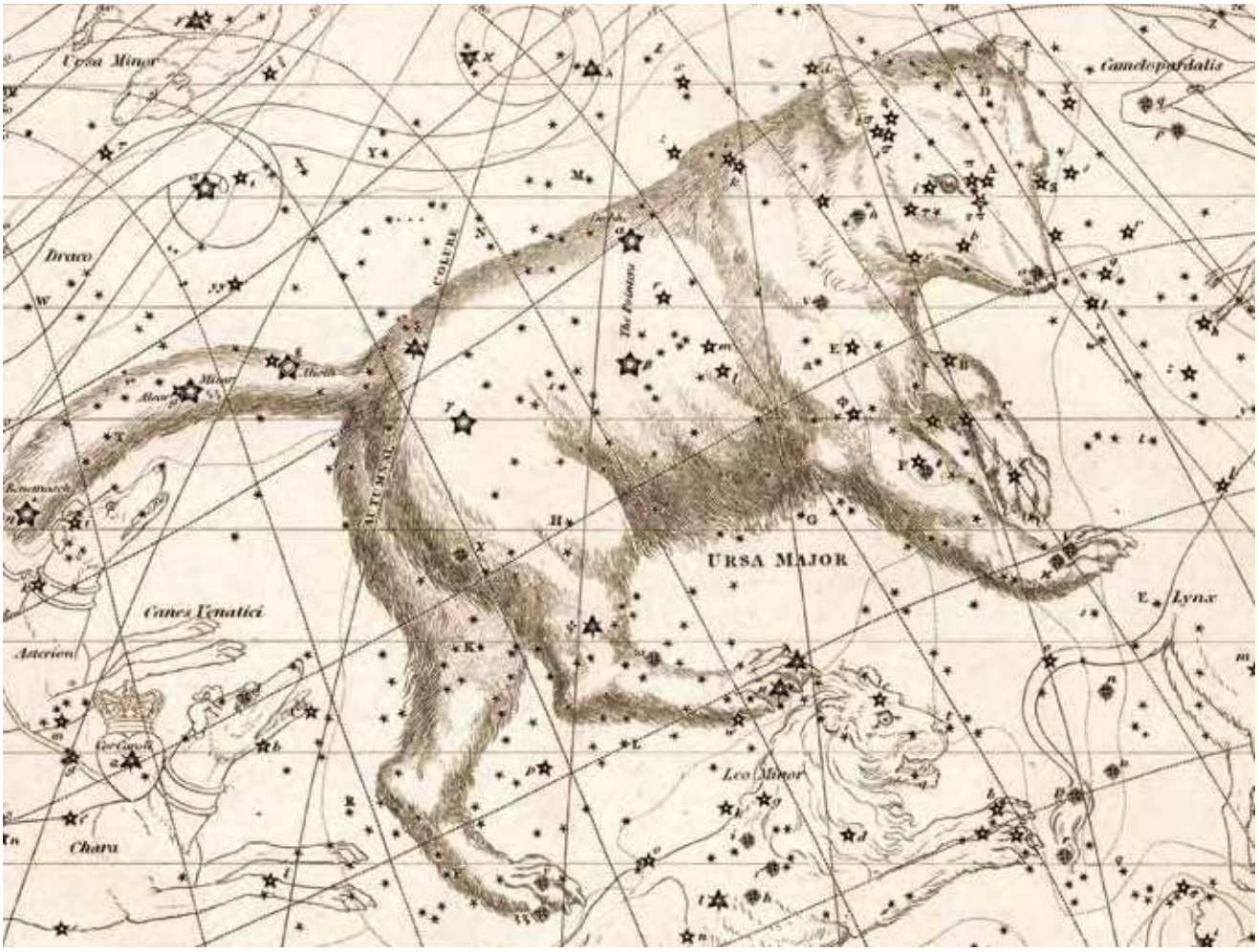
Projizierte Fantasien

Auch wenn die »Phainomena« die älteste überlieferte griechische Darstellung des Sternhimmels ist, bleibt zu vermuten, dass viele der erwähnten Sternbilder lange vor der klassischen Zeit des griechischen Altertums entstanden waren. Wann war das? Und woher kommen sie?

Bevor die Lichtverschmutzung unseren Nachthimmel eintrübte, gehörte es zum Alltag vieler Menschen, die Sterne zu betrachten. In Zufallsmustern Strukturen zu erkennen liegt in der Natur der menschlichen Wahrnehmung, und so verwundert es nicht, dass die Menschen in allen Kulturen und zu allen Zeiten eigene Sternbilder erfanden. Blicken wir zum nördlichen Sternhimmel, fällt besonders der Großen Bär auf, wissenschaftliche Bezeichnung: Ursa Major. (Dieser weiblichen Form des lateinischen Namens zufolge müssten wir genau genommen von der Großen Bärin sprechen.)

Die Gestalt der sieben mittelhellen Sterne wurde unter verschiedenen Namen bekannt, unter anderem als Großer Schöpflöffel (Big Dipper), Kürbisflasche, Großer Wagen und Pflug. Aratos bezeichnete die Gruppe sowohl als Bär als auch als Wagen. Letztere Bezeichnung kann natürlich erst nach der Erfindung des Rads entstanden sein, ungefähr im 4. vorchristlichen Jahrtausend; der Name Bär dagegen ist sicherlich viel älter. Überall in Eurasien kannten frühe Gesellschaften den Großen Bären sowie dazugehörige Mythen.

Populär war etwa, sich unter den vier Kastensternen den Bären vorzustellen,



MARY EVANS PICTURE LIBRARY

Der Große Bär, hier in einer Darstellung von Alexander Jamieson aus dem Jahr 1822, ist eines der bekanntesten Sternbilder. Die drei Sterne im Schwanz des Bären wurden häufig als die drei Jäger bezeichnet.

den drei Jäger verfolgen – die Sterne des Handgriffs. Doch nicht nur Griechen, Basken, Hebräer sowie Angehörige mehrerer Kulturen in Sibirien überlieferten diese Kombination aus sichtbaren Sternen und Deutung; auch in Nordamerika ist sie verbreitet. Mit gewissen Variationen benannten die Indianer der neuen Welt – darunter die Cherokee, Algonquin, Zuni, Tlingit und Irokesen – einen Bären, dem drei Jäger folgen.

Wie können wir diese enge Übereinstimmung von Traditionen der Alten und Neuen Welt erklären? Es ist wenig wahrscheinlich, dass die Menschen unabhängig voneinander über eine so große Region hinweg im Trapez vier heller Sterne einen Bär erkannten. Ausschließen können wir außerdem, dass die Indianer das Sternbild von Missionaren oder europäischen Siedlern übernahmen, bevor Ethnologen ihr Vorkommen dokumentierten. Diese Forscher zeichneten oft schon kurz nach ihrem ersten Kontakt mit den Indianern deren Erzählungen auf; die Mythen weichen jedoch durchaus in Details von den Versionen der europäischen Siedler ab.

Plausibler ist es, dass die ersten Siedler den Mythos in die Neue Welt mitbrachten, als sie vor etwa 14 000 Jahren die Beringstraße überquerten. Altsteinzeitliche Jäger und Sammler wanderten damals über eine Landbrücke, die in der letzten Eiszeit bei niedrigem Meeresspiegel entstanden war und Sibirien mit Amerika verband. Ihre Gedanken lebten in ihren Nachfahren weiter, als diese den Kontinent besiedelten. Man kann sich leicht eine Kette vieler Generationen vorstellen, die vom steinzeitlichen Sibirien bis in die Berge und Ebenen der Neuen Welt und schließlich in das moderne Colorado der 1950er Jahre reicht – und vom Bären am Himmel erzählt.

Das Bären-Sternbild könnte lange vor dieser Völkerwanderung entstanden sein. Europäische Höhlenmalereien, Kunstwerke und Ansammlungen der Schädel von – heute ausgestorbenen – Höhlenbären reichen mehr als 30 000 Jahre zurück und legen nahe, dass diese Tiere besonders verehrt wurden. Vielleicht spiegelt das Motiv die Praxis zeitgenössischer Rituale wider. Bleibt dies zwar eine Spekulation, so ist doch sehr wahrscheinlich, dass der Große Bär eine der ältesten überlieferten Erfindungen der Menschheit ist.

Assyrische Anfänge

Die frühesten direkten Beweise für die Existenz der Sternbilder stammen von Inschriften auf Steinen sowie Schrifttafeln aus Ton, die in Mesopotamien, dem Gebiet des heutigen Irak, entdeckt wurden. Das »Gebet an die Götter der Nacht«, ein Text aus dem alten Babylon der Zeit um 1700 v. Chr., erwähnt die Namen von vier Sterngruppen, darunter den Wagen, drei helle Einzelsterne sowie ▷

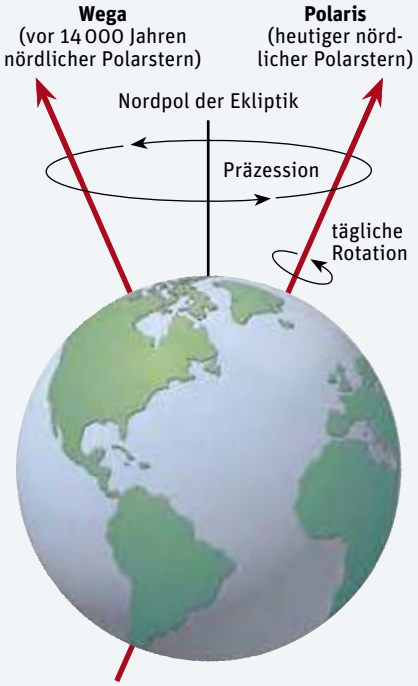
Präzession: die scheinbare Wanderung der Sternbilder

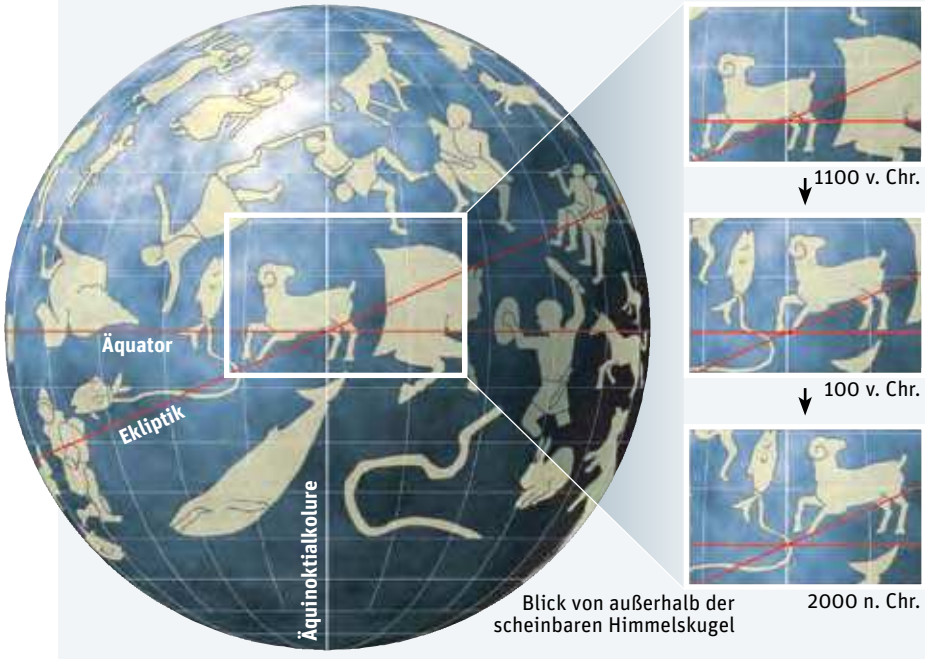
Um Sternbilder datieren zu können, muss man die so genannte Präzession berücksichtigen. Diese von den Gezeitenkräften des Monds, der Sonne und der Planeten verursachte Kreiselbewegung der Erde bewirkt, dass sich die Örter der Sterne am Himmel während der Jahrtausende zyklisch verschieben. Entsprechend stehen im Lauf der Zeit unterschiedliche Sterne in der Nähe der Himmelspole und werden von den Menschen als Polarstern betrachtet. Die Sternörter gleiten entlang der Ekliptik, wobei sie alle 72 Jahre etwa ein Grad (zwei Monddurchmesser) zurücklegen.

Genau wie Orte auf einem Erdglobus sind Sternörter als Winkelabstände von bestimmten Großkreisen am Himmel definiert. Der Himmelsäquator ähnelt dem Erdäquator, während die Koluren den irdischen Längengraden entsprechen, wie etwa dem Nullmeridian durch Greenwich in England. Die Frühlings-Tag-und-Nacht-Gleiche ist der Ort, an dem die Sonne den Himmelsäquator von Süd nach Nord passiert (in der Grafik links unten markiert durch den Kreuzungspunkt der roten Linien).

Die Präzession bewirkt, dass sich dieser Punkt gegen die Sterne im Hintergrund verschiebt, wodurch sich die Tierkreissternbilder etwa alle zwei Jahrtausende um ein Zeichen verschieben. In der griechischen Klassik lag die Tag-und-Nacht-Gleiche im Widder, dann wanderte sie in die Fische und kürzlich in den Wassermann – daher der Ausdruck »Zeitalter des Wassermanns«.

Der Astronom Hipparch entdeckte die Präzession um das Jahr 128 v. Chr., nachdem ihm aufgefallen war, dass sich die Position der Sonne zum Zeitpunkt der Tag-und-Nacht-Gleichen gegenüber alten Berichten verändert hatte. Diese erstaunliche intellektuelle Leistung machte ihn zum wohl bedeutendsten Astronomen der Antike.





Die Position der Sternbilder am Himmel verschiebt sich allmählich gegenüber dem Äquator und den Äquinoktialkoluren – das sind die beiden Großkreise am Himmel, die gleichzeitig durch die Himmelspole sowie durch den Frühlings- und Herbstpunkt verlaufen. Aus der Verschiebung gegenüber früheren Beobachtungen lässt sich auf die Länge des verstrichenen Zeitintervalls schließen. Aus der Lage des Widders auf dem Himmelsglobus des Atlas von Farnese (siehe Kasten S. 88) folgt, dass dessen ursprüngliche Fassung um das Jahr 125 v. Chr. entstand, als das Widderhorn gerade eben mal die Kolure berührt hatte.

INFOGRAFIKEN: MELISSA THOMAS

▷ die Plejaden. Inschriften aus der Zeit vor 1300 v. Chr. enthalten Symbole, die später auch Sternbilder bezeichneten. Damals wurden sie jedoch noch nicht in einem astronomischen Kontext interpretiert und an den Himmel projiziert. Zwar lassen die wenigen überlieferten Belege viele Fragen offen, doch können wir daraus schließen, das die Mesopotamier vor dem Jahr 1300 v. Chr. nur wenige Sternbilder kannten.

Seitdem entstanden Inschriften auf Grenzsteinen sowie Siegelzylindern, in denen Sternbildzeichen häufig in Gruppen und immer wieder zusammen mit Symbolen für Sonne, Mond und Planeten abgebildet sind. Dieser enge Zusammenhang legt nahe, dass mit den Zeichen nun tatsächlich Sternbilder gemeint waren. Nach der Zeit um 1100 v. Chr. entstanden Listen auf Tontäfelchen, die mehr als 30 Sternbilder aufzählen, welche über den gesamten Himmel reichen. Eine Serie von drei Tafeln namens »Mul.apin« enthält Beobachtungen der Örter und Bewegungen fast aller in Mesopotamien benannten Sterngruppen. Der Text »Mul.apin« wurde häufig kopiert und blieb dabei fast unverändert – offenbar war es ein Lehrbuch oder Almanach. Die noch heute existierenden Abschriften stammen aus der Zeit zwischen 687 und dem 3. Jahrhundert v. Chr.

Beim Versuch, das Alter der Sternbilder zu bestimmen, hilft ein Phänomen, das Astronomen als Präzession bezeichnen: die stetige, westwärts gerichtete Verschiebung der Sternörter gegen das Koordinatennetz, das der Himmelsnordpol und die Tag-und-Nacht-Gleichen aufspannen (siehe den Kasten links). Demzufolge verschiebt sich der von einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche aus sichtbare Ausschnitt des Sternhimmels mit einer Periode von etwa 25 850 Jahren. So können wir die Länge verstrichener Zeiträume wie auf einer Uhr ablesen, wobei die Sterne einen sehr langsamen Stundenzeiger darstellen, der sich vor dem Ziffernblatt der Himmelskoordinaten bewegt.

In Mesopotamien ausgegrabene Tontafeln enthalten die ältesten datierbaren Hinweise auf die Sternbilder

Die im »Mul.apin« aufgeführten relativen Örter der Sterne am Himmel können wir in ungefähre Daten übersetzen. So ist den Tafeln zu entnehmen, dass der Frühlingspunkt – als Ort der Sonne zur Frühjahrs-Tag-und-Nacht-Gleiche – im östlichen Teil des Sternbilds lag, das wir heute als Widder kennen. Das war spät im 2. Jahrtausend v. Chr der Fall. Darüber hinaus verraten uns die Angaben auch etwas über die geografische Breite des Beobachters, sodass die vollständige Analyse der Sternbildliste sowohl das ungefähre Datum als auch die Breite des Beobachtungsorts offenbart.

Hermann Hunger von der Universität Wien und David Pingree von der Brown-Universität in Providence (Rhode Island) untersuchten mehrere Listen des »Mul.apin« und verglichen sie mit späteren Sterntabellen, unter anderem derjenigen des Ptolemaios. Sie schlossen daraus, die Sternenliste des »Mul.apin« müsse um das Jahr 1000 v. Chr. bei einer geografischen Breite von 36 Grad entstanden sein – das entspricht Assyrien (dem Nordteil Mesopotamiens). Da das »Mul.apin« fast alle der jemals in Keilschrifttexten erwähnten Sternbilder auflistet, müssen diese in dem relativ kurzen Intervall von 1300 bis 1000 v. Chr. entstanden sein.

Unabhängig von der Arbeit Hungers und Pingrees habe ich im »Mul.apin« 114 Beschreibungen identifiziert, die auf Datum und Breite der Beobachtungen schließen lassen. Kein einziger Datenpunkt ist für diesen Zweck allein ausreichend, aber die statistische Auswertung dieses umfangreichen Datenmaterials lässt recht zuverlässige Schlussfolgerungen zu. Also stammen die Berichte im »Mul.apin« mit großer Wahrscheinlichkeit aus der Zeit zwischen 1180 und 1020 v. Chr. sowie einer geografischen Breite zwischen 31,5 und 34,5 Grad nördlicher Breite – im Einklang mit dem Ergebnis der Untersuchung von Hunger und Pingree.

Unabhängig davon kann man aus der Position der südlichsten Sternbilder einer bestimmten Liste deren Entstehungszeitpunkt sowie den Standort ihrer Autoren abschätzen – vorausgesetzt, diese machten ihre Beobachtungen von derselben geografischen Breite aus. Von dort sind alle noch weiter südlich befindlichen Sterne unsichtbar und markieren eine Kugelkappe um den Himmelssüdpol. Die Südränder der südlichen Sternbilder stehen an deren Grenze. Ihr Zentrum lag damals auf der Polachse. Deren Abweichung von der heutigen Polachse verrät uns den seit der Benennung der Sternbilder verstrichenen Zeitraum –, während wir aus der Größe der Kugelkappe die geografische Breite erfahren.

Vom Pflug zum Dreieck

Aus der Lage der sechs südlichen Sternbilder des »Mul.apin«, die den Rand der Kugelkappe definieren, schließe ich, dass sie zu Beginn des 1. Jahrtausends v. Chr. auf einer nördlichen Breite von ungefähr 33 Grad benannt wurden. Das passt gut zu den archäologischen Befunden und lässt vermuten, die Sternbilder im »Mul.apin« seien in Assyrien entstanden.

Die Motive dieser Konstellationen bilden eine eigenartige Mischung. Einige stellen Götter dar, andere Tiere, beim Rest handelt es sich um alltägliche Geräte aus der Landwirtschaft. Der Text nennt zahlreiche Omen, die auf den Sterngruppen basieren, und benutzt Letztere auch für einen Kalender – lebenswichtig für eine Agrargesellschaft. Omen zu deuten, Rituale für die ▷

Wissen aus erster Hand

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/info

Der Atlas von Farnese

Reliefs auf dem Himmelsglobus zeichnen die Sternbilder detailreich nach und zeigen auch den Himmelsäquator, die Wendekreise sowie die Koluren.

Die älteste bis heute überlieferte Darstellung aller griechischen Sternbilder findet sich auf einer römischen Statue aus dem 2. Jahrhundert v. Chr., die als Atlas von Farnese bezeichnet wird. Kunsthistoriker halten sie für die Kopie eines griechischen Originals. Die aus Marmor gemeißelte Statue, die heute in Neapel steht, zeigt Atlas mit einem Himmelsglobus auf den Schultern.

Eine detaillierte Analyse der Örter der Sternbilder auf dem Globus verrät, dass diese mit einer Abweichung von weniger als zwei Grad den im Jahr 125 v. Chr. sichtbaren Sternhimmel zeigen, wobei sich das Datum bis auf 55 Jahre genau bestimmten ließ. Die Originaldaten waren so systematisch und präzise, dass sie vermutlich einem Sternkatalog entstammten. Hipparch war der Einzige, der zu dieser Zeit einen solchen erstellt hatte.

Vergleicht man die Sternbilder auf dem Globus mit den damals existierenden Beschreibungen, so entsprechen sie nur den Angaben in Hipparchs Kommentar. Natürlich könnte ein anderer Astronom ungefähr zur selben Zeit einen weiteren Katalog erstellt haben, darauf gibt es jedoch keinen Hinweis. Mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ist Hipparchs Sternkatalog die Quelle.

LINKS: BRIDGEMAN ART LIBRARY / MUSEO ARCHEOLOGICO NAZIONALE NEAPEL; RECHTS (DETAIL RÜCKANSICHT): GRIFFITH OBSERVATORY, GERRY PICUS

▷ Götter abzuhalten und kalendarische Berechnungen anzustellen, waren Aufgaben der assyrischen Priester. Vermutlich waren diese auch die Erfinder der Sternbilder.

Viele der klassischen griechischen Sternbilder enthalten die mesopotamischen Sterngruppen. Muster, welche die Griechen als Steinbock und Zwillinge bezeichneten, waren den Assyrern unter ähnlichen Namen bekannt: Ziegenfisch und Große Zwillinge. Zwanzig Sternbilder übernahmen die Griechen unverändert, zehn weitere mit denselben Sterne tragen jedoch andere Namen. So wurden der assyrische Lohnarbeiter zum griechischen Widder und die Schwalbe zu den Fischen.

Das Sternbild Dreieck verdeutlicht, wie die Griechen mit den mesopotamischen Sterngruppen umgingen. Im »Mul.apin« wurden die Sterne des Dreiecks als Pflug bezeichnet, ein Name, der auch für den Bären verwendet wurde. Obwohl die Geometrie den Gelehrten Mesopotamiens und Ägyptens wohlbekannt war, galt sie dort allein als weltliches Werkzeug der Ingenieure. Thales von Milet brachte die Geometrie im 6. Jahrhundert v. Chr. von Ägypten nach Griechenland, wo sie aus einigen Faustregeln in ein organisiertes logisches System von großer Schönheit verwandelt wurde, als deren Gipfel Euklids Buch »Die Elemente« gilt, das um 300 v. Chr. entstand.

Erst nach dieser Verwandlung konnte man auf die Idee kommen, das Dreieck – als Symbol der Geometrie – am Himmel zu verewigen. Das Sternbild Dreieck ist deshalb sicherlich das Ergebnis der griechischen Umbenennung einer mesopotamischen Sterngruppe, die sich irgendwann in der Zeit zwischen Thales und Eudoxos beziehungsweise Aratos vollzog. In dessen »Phainomena« ist es nämlich enthalten.

Wenn der Orion flieht

Ob die Griechen vor der Einführung des Dreiecks bereits mehrere mesopotamische Sternbilder übernommen hatten, wissen wir nicht, doch die vorhandenen Überlieferungen sprechen dagegen. Die beiden ältesten schriftlichen Quellen der Griechen, die Epen des Homer und der Bauernalmanach des Hesiod (beide entstanden im 8. Jahrhundert v. Chr.), erwähnen zwei auffällige Sternbilder (Orion und den Großen Bären), zwei Sternhaufen (die Plejaden und die Hyaden) sowie zwei Einzelsterne (Sirius und Arktur).

Alle anderen griechischen Quellen aus der Zeit vor 500 v. Chr. schweigen sich über die Sterne gänzlich aus. Das lässt vermuten, die Griechen der vorklassischen Zeit hätten allein die auffälligsten Sternbilder benannt.

Die erste Schriftquelle, in der sich der griechische Blick auf den Nachthimmel umfassend niederschlug, war das Buch des Eudoxos aus dem 4. Jahrhundert v. Chr., von dessen Inhalt wir jedoch nur dank ausgiebiger Zitate bei Aratos und Hipparch wissen. Eudoxos' Buch enthält Beschreibungen folgender Art: »Der Kopf (des Drachen) kreist, wo die Grenzen von Unter- und Aufgang verschwimmen.«

Das soll vermutlich bedeuten, die Sterne im Drachenkopf seien vom Himmelsnordpol so weit entfernt, dass sie am nördlichen Horizont entlangschrammen. Dieser Zusammenhang gilt unmittelbar nur für eine bestimmte geografische Breite, die sich auf Grund der Präzession mit der Zeit verändert. Für sich betrachtet schränkt diese Bedingung die geografische Breite und den Zeitpunkt ihrer Entstehung nur wenig ein.

Anderswo schreibt Eudoxos: »Beim Aufgang des Skorpions im Osten flieht der Orion am westlichen Bannkreis.« Beide Sternbilder erscheinen gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen über dem Horizont. Allein oder in Kombination mit der ersten Aussage führt uns dies nicht wesentlich weiter.

BEIDE FOTOS: TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

Auf diesem mesopotamischen Grenzstein aus der Zeit nach 1300 v. Chr. (links) sind Sternbilder symbolisch dargestellt. Das Keilschrifttäfelchen von etwa 1100 v. Chr. (rechts) mit dem Text des »Mul.apin« enthält eine Liste der mesopotamischen Sternbilder.

Aufschlussreich wird die Untersuchung erst, wenn wir viele weitere Aussagen aus den »Phainomena« des Aratos heranziehen. Ich habe 172 solcher Stellen identifiziert, und damit schrumpft der Bereich auf 0,9 Grad – das entspricht 100 Kilometer in Nord-Süd-Richtung – und 80 Jahren in der Zeit. Daraus folgt, dass die Sternbilder im Jahr 1130 v. Chr. und bei 36 Grad Nord – wieder Assyrien, genau wie im »Mul.apin« – entstanden.

Beim Vergleich der beiden Quellen stellte ich zahlreiche Übereinstimmungen fest: Sie enthalten im Wesentlichen dieselben Sternbilder, jedoch unter verschiedenen Namen, und gehen vermutlich auf die Aufzeichnungen desselben assyrischen Beobachters zurück.

Es liegt nahe anzunehmen, die Griechen hätten irgendwann zwischen dem Jahr 1100 und 360 v. Chr. von den mesopotamischen Sterngruppen erfahren. Da es aber aus der Zeit vor 500 v. Chr. keine Hinweise auf die griechischen Sternbilder gibt – von der Erwähnung des Bären und des Orion bei Homer einmal abgesehen –, können wir den Zeitpunkt der Überlieferung gut einschränken.

Dazu passt, dass das babylonische System der Tierkreiszeichen um das Jahr 400 v. Chr. in Griechenland übernommen wurde, wobei der Tierkreis den scheinbaren Jahreslauf der Sonne vor dem Sternhimmel markiert, was für astrologische Berechnungen wichtig war. Auf welchem Weg sich das astronomische und astrologische Wissen damals verbreitete, wird wohl für immer ungewiss bleiben.

Nicht alle griechischen Sternbilder sind mesopotamischen Ursprungs. Die »Phainomena« führen 18 Sterngruppen auf, die sich in keiner anderen alten Quelle finden – und deren Namen sich deutlich auf die griechische Lebens- und Mythenwelt beziehen. So ist von Herkules die Rede, den am Himmel Tiere begleiten, die dieser große Krieger besiegt hat, unter anderem Löwe und Drache. Es gibt Ophiuchus, der die Schlange trägt, sowie den Delfin – was für eine Seefahrernation wie den Griechen passend ist. Sechs Sternbilder beziehen sich auf den griechischen Mythos der Rettung Andromedas durch Perseus. Das alles deutet darauf hin: Die Griechen erfanden diese Sternbilder selbst.

Muster im kulturellen Gedächtnis

Im Lauf der Zeit änderte sich die Bedeutung der himmlischen Bilderwelt. Zunächst erzählten die Bilder Geschichten von legendären Helden und Tieren. Dann dienten sie als Werkzeuge für Kalender und Navigatoren. Später wurde der Tierkreis zu einem Koordinatensystem für die Beobachtung von Planeten als Teil der von Babyloniern übernommenen Astrologie.

Aus den überlieferten Schriften des Hipparch können wir erkennen, wie sich der griechische Blick auf die Sterne wandelte. Zu Beginn seiner Laufbahn verglich dieser Gelehrte, wie weit die von Eudoxos überlieferten Sternbilder mit dem übereinstimmten, was er selbst am Himmel sah. Dabei stieß er auf zahlreiche Abweichungen.

Als er im Jahr 135 v. Chr. bemerkte, wie ein Stern plötzlich aufleuchtete – vermutlich war es eine Nova oder Supernova –, kam er auf die Idee, einen Katalog der helleren Sterne zusammenzustellen. Damit sollte man etwaige neue Sterne besser identifizieren können. Leider ist dieses einflussreiche Werk nicht überliefert. Wir wissen jedoch, dass es dem Gelehrten damit gelang, die Präzession zu entdecken. Das war für die Astronomie ein entscheidender Durchbruch und machte die Erforschung der Sternbilder zu einer Wissenschaft.

Zweifellos ist es nicht leicht, die Quellen dieser Himmelsgeschichte zu interpretieren, denn sie sind lückenhaft. Dennoch können wir aus ihnen ablesen, wie Konzepte entstanden und sich in zahlreichen Kulturen, über lange Zeiten und große Entfernungen ausbreiteten – und dabei gelegentlich abgewandelt wurden. Die Sternbilder lassen uns einen Teil der Kulturgeschichte erkennen, den uns archäologische Funde nicht erschließen können. Es ist der Wandel von einer religiösen Himmelskunde zu einer oftmals praktischen Wissenschaft, vom abstrakten Ritual zum messbaren Phänomen der Präzession. ◁

Bradley E. Schaefer ist Professor für Astronomie an der Staatsuniversität von Louisiana in Baton Rouge. Er ist Mitherausgeber des »Journal for the History of Astronomy« sowie der Zeitschrift »Archaeoastronomy«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Welcher Stern ist das? Von Joachim Hermann. Kosmos-Verlag 2006

Die Mythologie der Sternbilder. Von Wolfgang Schadewaldt. Insel-Verlag 2002

The latitude and epoch for the origin of the astronomical lore of Eudoxus. Von Bradley E. Schaefer in: Journal for the History of Astronomy 35, S. 161, 2004

Astral sciences in Mesopotamia. Von H. Hunger und D. Pingree. Brill, Leiden 1999

Asiatic parallels in North American star lore: Ursa Major. Von W. B. Gibbon in: Journal of American Folklore 77, S. 236, 1964

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864264.

GEOFF WARD

Endlich Impfung gegen Rotaviren

Die meisten schweren Durchfallerkrankungen bei Kindern verschulden hoch infektiöse Rotaviren. In Entwicklungsländern verläuft die Infektion allzu oft tödlich. Nach jahrzehntelangen Bemühungen stehen nun Schluckimpfungen gegen die Erreger zur Verfügung.

Von Roger I. Glass

Bei tödlichen Viren denken viele zuerst an unheimliche, seltene Krankheiten wie Sars oder Ebola. Von Rotaviren haben dagegen die wenigsten gehört. Dabei sterben an Infektionen mit diesem aggressiven Durchfallerreger bedeutend mehr Menschen – vor allem Säuglinge und Kleinkinder. Denn praktisch jedes Kind fängt sich das Virus in den ersten Lebensjahren mindestens einmal ein, ganz gleich, in welchem Land der Welt es aufwächst.

Typisch für die Erkrankung ist schwerer Brechdurchfall. Die Diarrhö hält oft tagelang an. Dadurch verliert der kindliche Körper schnell viel Wasser, was unbehandelt zu einem Kreislaufschock führen kann. Etwa jedes fünfzigste Kind in Europa kommt deswegen in den ersten Lebensjahren ins Krankenhaus. In Deutschland dürften das jährlich rund 25 000 Fälle sein. Die Behörden schätzen, dass hier zu Lande eine halbe Million Menschen im Jahr an einer Rotavirus-Infektion erkranken. Todesfälle sind bei uns mit meist unter einem halben Dutzend pro Jahr selten. Weltweit sterben daran jedoch schätzungsweise über 600 000 Kinder jährlich. Etwa jeder zwanzigste Tod von Kindern unter fünf Jahren geht auf dieses Virus zurück.

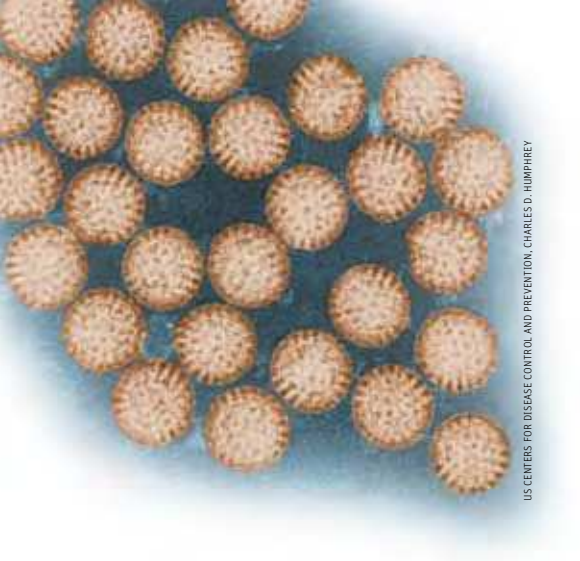
Nun endlich ist die Medizin so weit und packt das Übel an der Wurzel – drei Jahrzehnte nach der Entdeckung des Erregers. Nach manchen unerwarteten Komplikationen, einigen Überraschungen und schweren Fehlschlägen sind seit 2006 in vielen Ländern zwei akribisch geprüfte Impfstoffe gegen Rotaviren verfügbar. Ihre Zuverlässigkeit haben die beiden neuen Vakzinen bereits in umfangreichen klinischen Tests an einigen zehntausend Kindern in verschiedenen Ländern erwiesen. Inzwischen sind vielerorts Impfprogramme angelaufen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) und die Globale Allianz für Impfstoffe und Immunisierung (Gavi) rechnen diese zu den Vorhaben mit hoher Priorität.

Entdeckt hat das Rotavirus im Jahr 1973 die junge Mikrobiologin Ruth Bishop, die sich an der Königlichen Kinderklinik in Melbourne (Australien) mit Magen-Darm-Krankheiten befasste. Damals suchten Ärzte dringend nach den Ursachen rätselhafter schwerer Durchfallleiden bei Kindern. Denn in allzu vielen Fällen konnten sie keinen schuldigen Erreger erkennen. Das Team um Ruth Bishop sah sich unter anderem Gewebeproben aus dem Darm von kranken Kindern unter dem Elektronenmikroskop an. Die erstaunten Forscher fanden die Zellen der Darmschleimhaut übersät mit winzigen Objekten von radähnlichem Aussehen: offensichtlich Viren. Wegen ihres Erscheinungsbilds erhielten die Rotaviren ihren Namen: Lateinisch *rota* bedeutet unter anderem »Rad«.

Eine Rotavirus-Infektion überleben viele Kinder nur dank künstlicher Flüssigkeits- und Elektrolytzufuhr. In armen Ländern kommt jede Hilfe oft zu spät.

Viren, die auch in Industrieländern grassieren

Meine Aufmerksamkeit weckten die Rotaviren 1979. In dem Jahr gingen meine Frau und ich nach Dhaka, der Hauptstadt von Bangladesch, an das Internationale Zentrum für die Erforschung von Durchfallerkrankungen. Jung und idealistisch, wollten wir etwas für die Kinder eines Landes tun, in dem Diarrhö zu den führenden Todesursachen besonders in den ersten Lebensjahren zählte und leider immer noch zählt. Das Krankenhaus des Forschungszentrums konnte die vie- ▷



US CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, CHARLES D. HUMPHREY

Rotaviren sehen bei starker Vergrößerung unter dem Elektronenmikroskop fast wie winzige Räder aus (hier nachträglich koloriert). Das lateinische Wort *rota* bedeutet unter anderem »Rad«.

len »Darmgrippe«-Patienten kaum aufnehmen. Etliche Kinder lagen in den Fluren oder draußen in Zelten.

Wie damals üblich, dachten auch wir zunächst an bakterielle Erreger. Die Nachforschungen ergaben aber, dass viele der kleinen Patienten weder an Cholera, Salmonellen, Bakterienruhr noch an gefährlichen *Escherichia-coli*-Keimen litten. Vielmehr mussten wir erkennen, dass sie von Rotaviren gequält wurden, über die die Medizin damals noch sehr wenig wusste. Ein einfacher Test zeigte: 25 bis 40 Prozent der unter Fünfjährigen, die wegen schweren Durchfalls in unsere Klinik kamen, litten an Infektionen mit diesen Viren.

Ähnliches fanden Mediziner in vielen anderen Teilen der Welt heraus. Bald stand fest, dass Rotaviren weltweit verbreitet sind – und mehr noch: dass solche Infektionen in den ärmsten Ländern zu den häufigsten Todesursachen zählen. Im Jahr 1985 setzte das Institute of Medicine (IOM) der amerikanischen Wissenschaftsakademien mit Sitz in Washington Rotaviren an die Spitze einer Liste von Erregern, gegen die in den Entwicklungsländern dringend Impfstoffe benötigt würden.

Damals ahnten wir nicht, dass diese Viren auch in den wohlhabenden Industrienationen massenhaft grassieren. Ein Jahr später kehrte ich in die USA zurück – an die Zentren für Gesundheitskontrolle und -vorsorge (CDC) in Atlanta (Georgia), einer Einrichtung des US-Gesundheitsministeriums. Amerikanische Ärzte erkannten die Infektion damals selten. Die Weltgesundheitsorganisation führte sie nicht einmal in der Internationalen Klassifikation der Krankheiten (ICD). Meine Mitarbeiter und ich wollten herausfinden, ob die Infektion in den Vereinigten Staaten oft vorkommt.

Diarrhö unklarer Ursache

Nur – wie erforscht man den Rang einer Krankheit, die wenig diagnostiziert wird, die nie in Krankenakten als Grund für eine stationäre Behandlung auftaucht und welche die wenigsten Kinderärzte überhaupt kennen? Zunächst verschaffte sich meine Kollegin Mei Shang Ho einen Überblick über die Gründe für Klinikaufenthalte von Kindern. Zwölf Prozent der unter Fünfjährigen, so fand sie, mussten wegen Diarrhö behandelt werden, deren Ursache in den meisten Fällen nicht feststand. Wir konnten dann tatsächlich nachweisen, dass die große Mehrzahl solcher Kinder eine schwere Rotavirus-Infektion durchmacht.

Unsere Studien brachten für die USA drei weitere denkwürdige Befunde. Erstens: Die Krankheit folgt einem jahreszeitlichen Verlauf – deutlich am häufigsten tritt sie in den Wintermonaten auf. Zweitens: Die weitaus meisten Kinder, die deswegen ins Krankenhaus kommen, sind jünger als fünf Jahre. Drittens: Zu jeder Jahreszeit erzeugen Infektionen mit Rotaviren bei kleinen Kindern die meisten schweren Durchfälle. Ähnliches gilt für Europa.

Heute wissen Epidemiologen noch manches mehr. Rotaviren sind weltweit die bei Weitem häufigsten Erreger von Diarrhö bei Kindern. Irgendwann im Alter von drei Monaten bis fünf Jahren steckt sich praktisch jeder Mensch damit an. Für diese Viren gelten andere Regeln als für übliche bakterielle Durchfallerreger. Diese verbreiten sich über kontaminierte Lebensmittel und verunreinigtes Trinkwasser und grassieren daher vor allem in den ärmeren Regionen der Welt. Mit Rotaviren aber infizieren sich die Kinder in Amerika oder Europa ebenso oft wie in Bangladesch. Offenbar sind Rotaviren hoch ansteckend und verbreiten sich ähnlich leicht wie zum Beispiel Schnupfenviren. Normale Hygiene kann gegen eine Kontamination wenig ausrichten.

Auch molekulare und klinische Studien erweisen deren außerordentliche Virulenz (siehe Kasten S. 94). Nur zehn Viruspartikel bei der Ansteckung – in einem Speicheltröpfchen am Daumen oder auf dem Spielzeug – können genügen, damit Kleinkinder schwer erkranken. Kommen die Viren in den Mund, so gelangen sie auch in den Darm. In den Zellen der Darmschleimhaut vermehren sie sich rasend schnell. Binnen 24 Stunden werden aus zehn Partikeln Millionen. Unmengen viraler Proteine, auch Giftstoffe sowie die neu hergestellten Viren überfrachten die Darmzellen und bringen sie um. Jetzt löst sich das Darmepithel ab, und über die Darmwand entweichen große Mengen von Flüssigkeit und Elektrolyten, die das Kind in Durchfallschüben abgibt. Ohne eine adäquate Therapie mit Wasser- und Elektrolytzufuhr kann es in nur ein bis zwei Tagen ein Zehntel seines Körpergewichts verlieren und einen lebensbedrohlichen Volumenmangelschock erleiden.

Dauerhafte Schäden sind nach überstandener Erstinfektion nicht zu erwarten. Auch erkranken nur relativ wenige Kinder nochmals schwer. Sie haben nun eine eigene Immunität erworben – ein Immungedächtnis gegen den Erreger.

In Kürze

- Praktisch jedes kleine Kind erkrankt durch Rotaviren mindestens einmal an **schwerem Durchfall oder Brechdurchfall**. Sogar Ärzte diagnostizieren die Infektion noch oft fälschlich als »Darmgrippe«.
- Auch in Deutschland sterben jedes Jahr einige Kinder an der **hoch infektiösen Krankheit**, Tausende müssen im Krankenhaus behandelt werden. In ärmeren Ländern erliegen der Infektion weltweit über 600 000 Kinder jährlich.
- Forschungen zeigten bald, dass dieses aggressive, hoch virulente Virus nur mit einem **Impfstoff** einzudämmen sein würde. Nach vielen Fehlschlägen gibt es jetzt sogar mehrere Vakzinen für eine **Schluckimpfung**.

Beim nächsten Kontakt mit Rotaviren macht ihr Immunsystem den Eindringling schnell unschädlich. Wichtig wäre darum, dem oft dramatischen Verlauf der ersten Infektion vorzubeugen. Das, so überlegten die Forscher, ließe sich mit einer Impfung erreichen, die das kindliche Abwehrsystem zum Aufbau solch einer Immunität anstachelt, das heißt, die eine Immunisierung möglichst wie nach einer echten Infektion auslöst.

Entscheidung für Schluckimpfung

Von Seiten der Medizin gehören Impfungen zu den stärksten Waffen gegen Infektionskrankheiten. Im Gesundheitswesen zählt Impfen überdies zu den effizientesten Maßnahmen. Ob eine Vakzine abgewandelte lebende Erreger oder abgetötete enthält oder nur bestimmte Schlüsselproteine von ihnen – der Trick ist immer, dem Immunsystem einen Feindangriff vorzugaukeln, damit es Antikörper produziert, wie es das auch gegen den echten Erreger täte. Tritt später der Ernstfall ein, ist der Körper dagegen schon gewappnet und bildet – wie nach durchgemachter Erkrankung – gegen die eindringenden Viren oder Bakterien unverzüglich große Mengen Antikörper.

Bereits vor zwanzig Jahren kam bei mehreren Pharmafirmen Interesse auf, einen Rotavirus-Impfstoff zu entwickeln. Angesichts des sicherlich zu erwartenden riesigen Absatzmarktes für eine solche Vakzine erschienen die hohen Kosten für die Erzeugung gerechtfertigt. Es würde auch keinen besonderen Aufwand erfordern, den Impfstoff selbst an entlegene Orte zu bringen. Er könnte im Rahmen des (unter Schirmherrschaft von WHO und Unicef) schon bestehenden Impfprogramms verteilt werden, das rund 80 Prozent aller Kinder weltweit mit Standardimpfungen versorgt.

Nach einigem Hin und Her fiel die Entscheidung für die Art des Impfstoffs zu Gunsten einer Schluckimpfung mit abgeschwächtem Lebenderreger – in Anlehnung an die Schluckimpfung gegen Kinderlähmung, die der polnisch-amerikanische Virologe und Mediziner Albert B. Sabin in den 1950er Jahren entwickelt hatte.

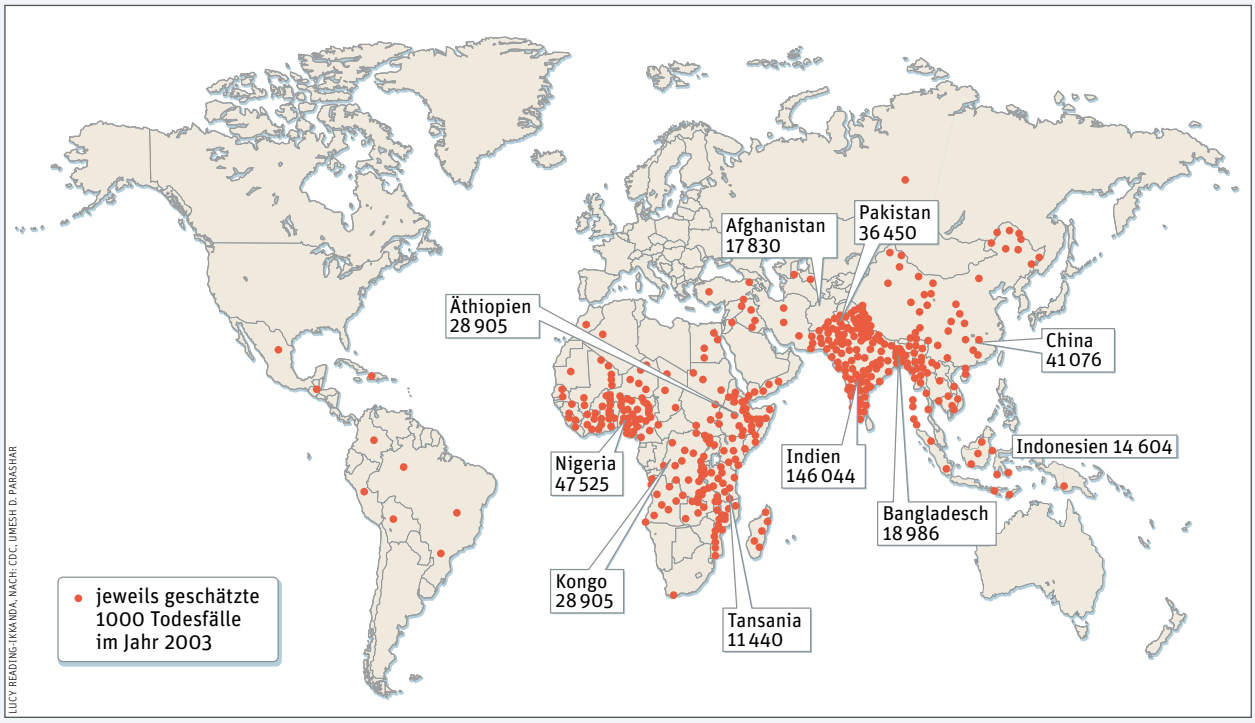
Sabin vertrat den Standpunkt, vermehrungsfähige Viren, die aber zu schwach sind, um eine Erkrankung zu erzeugen, eigneten sich am ehesten, um einen Immunschutz ähnlich wie nach einer echten Infektion auszulösen. Eine Schluckimpfung bietet sich bei Rotaviren schon deshalb an, weil sich die Immunreaktion eben dort aufbauen kann, wo dieses Virus angreift: im Darm.

1983 war der erste solche Impfstoff testreif. Erarbeitet hatten ihn Francis Andre von der Firma Smith Kline-RIT, heute GlaxoSmithKline Biologicals, in Rixensart (Belgien), und der Kinderarzt Timo Vesikari von der Universität Tampere (Finnland). Die Vakzine basierte auf einem Rinder-Rotavirus, das zum einen den Vorteil hatte, sich in Kultur gut vermehren zu lassen. Außerdem verhielt es sich im Menschen offenbar wie ein abgeschwächter Humanerreger.

Die erste klinische Studie lief in Finnland. Das Ergebnis ist als Durchbruch zu verzeichnen: Für geimpfte Kinder sank die Gefahr einer schweren Rotavirus-Infektion um 88 Prozent. Damit ▷

Globales Kindersterben durch Rotaviren

In den ersten fünf Lebensjahren erkrankt auch in Europa und Nordamerika fast jedes Kind an einer Rotavirus-Infektion. In Entwicklungsländern sterben daran jährlich Hunderttausende. Die Karte benennt die zehn im Jahr 2003 am stärksten betroffenen Länder. Jeder Punkt steht für geschätzte 1000 Todesfälle. Die höchste Sterberate pro Kopf verzeichnete Bangladesch.



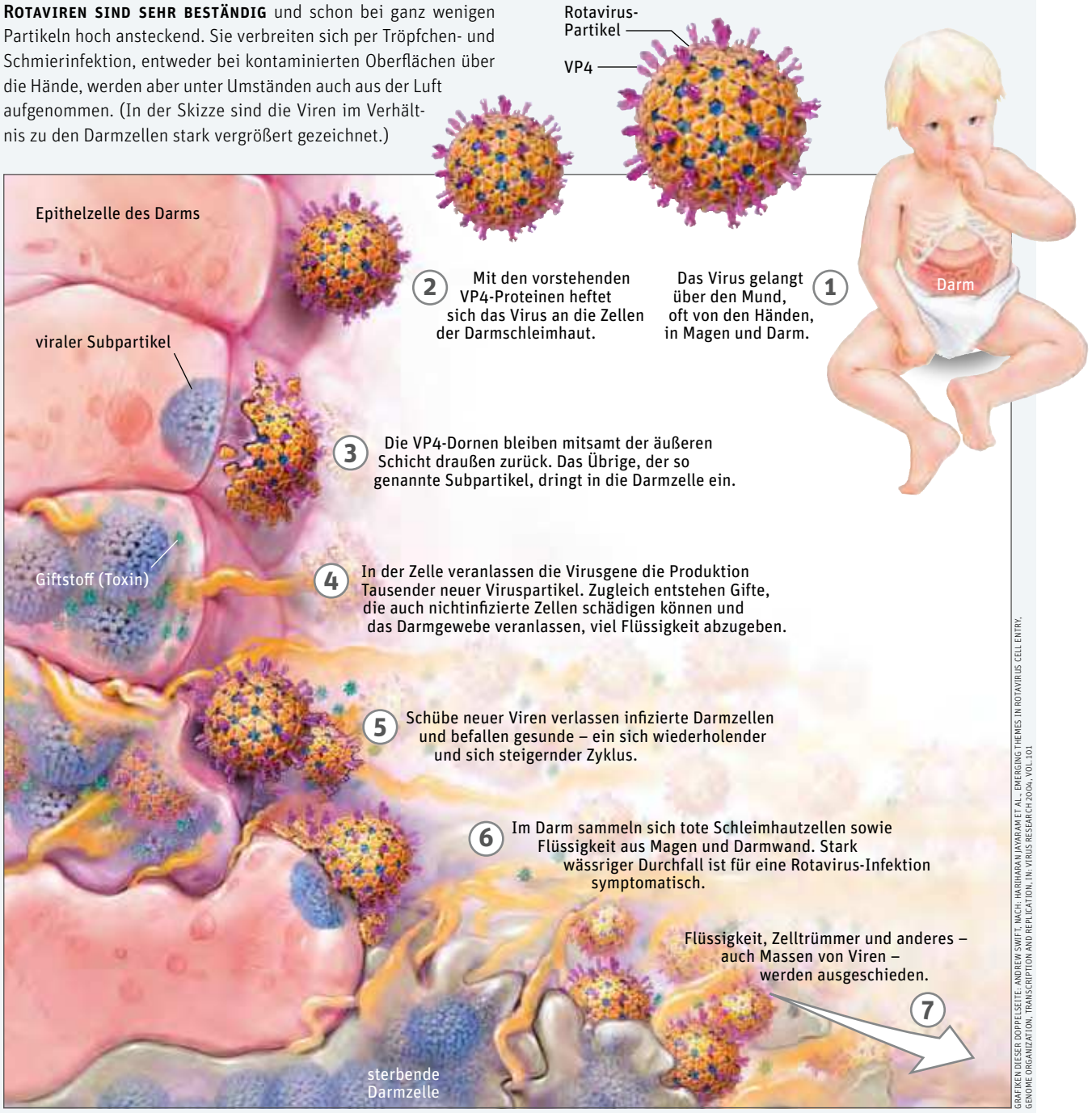
war erwiesen, dass gegen diesen Erreger eine Schluckimpfung mit Lebendviren eine Immunität erzeugen kann. Zudem schien die Vakzine keine schwereren Nebenwirkungen zu verursachen.

Daraufhin ließ Smith Kline-RIT den neuen Impfstoff in weiteren Ländern testen. Bald schien es, als würden bis zum Ende der 1980er Jahre die vielen Todesfälle durch Rotaviren bei Kindern der Vergangenheit angehören. Leider gab es dann doch einen Rückschlag. Studien mit der Vakzine in Afrika und Peru brachten einige widersprüchliche und enttäuschende Resultate, deren Ursachen sich nicht völlig klären ließen. Zwar ist bekannt, dass verschiedene Umstände den Effekt einer Impfung beeinträchtigen können – so ein schlechter Allgemeinzustand des Impflings, bestehende unbehandelte Infekte, Mangelernährung und Parasitenbefall. Doch wegen der unklaren Befunde stoppte das Unternehmen das Impfprogramm.

Die Ursache dafür, warum der Impfstoff anscheinend mitunter nicht hielt, was er zunächst versprach, suchten Forscher der amerikanischen Nationalen Gesundheitsinstitute, NIH, in Bethesda (Maryland) und vom Wistar-Institut der Universität von Pennsylvania in Philadelphia zu ergründen. Sie vermuteten, der Rindervirus-Stamm könnte doch zu

Wie dieser Durchfallerreger Verheerung stiftet

Rotaviren sind sehr beständig und schon bei ganz wenigen Partikeln hoch ansteckend. Sie verbreiten sich per Tröpfchen- und Schmierinfektion, entweder bei kontaminierten Oberflächen über die Hände, werden aber unter Umständen auch aus der Luft aufgenommen. (In der Skizze sind die Viren im Verhältnis zu den Darmzellen stark vergrößert gezeichnet.)



GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: ANDREW SWIFT, NACH: HARIHARAN JAYARAM ET AL., EMERGING THEMES IN ROTAVIRUS CELL ENTRY, GENOME ORGANIZATION, TRANSCRIPTION AND REPLICATION. IN: VIRUS RESEARCH 2004, VOL. 101

schwach gewesen sein, um sich auch unter schwierigen Bedingungen ausreichend für eine passable Immunantwort zu vermehren. Darum fahndeten sie nach günstigeren Alternativen.

Albert Kapikian von den NIH fand bei Rhesusaffen einen potenziell geeigneten Virusstamm. Fred Clark und Stanley Plotkin vom Wistar-Institut isolierten ein anderes, vielleicht etwas besser vermehrungsfähiges Rinder-Rotavirus. Für beide Stämme begannen klinische Studien. Aber auch deren Ausgang war zwiespältig. Teils wirkte die Impfung anscheinend gut, teils offenbar nicht wie gewünscht. Bis zu einer verlässlichen Vakzine sollte die Wissenschaft noch einige Jahre brauchen.

Mittlerweile klärten andere Wissenschaftler den molekularen Aufbau der Rotaviren. Was unter dem Elektronenmikroskop wie ein Rädchen aussieht, ist tatsächlich ein kugelförmiges Gebilde (siehe Kasten rechts). Ein Virion, also ein infektiöses Viruspartikel, besteht aus drei Außenschichten (Rotaviren besitzten keine eigentliche Virushülle), die das Erbmaterial umschließen: elf doppelsträngige Segmente (Einzelstücke) aus RNA mit jeweils dem Gen für ein Protein. Einige der Proteine sind so genannte Strukturproteine des Viruspartikels (nummeriert als VP1 und so weiter), andere sind Nichtstrukturproteine (NSP) mit besonderen Aufgaben im viralen Lebenszyklus, die erst in infizierten Zellen hergestellt werden. Sie helfen bei der Virusvermehrung beziehungsweise stören die Darmfunktion des Wirts. Die Impfstoffforscher konzentrierten sich besonders auf die Außenmoleküle des Virus, weil vor allem diese für die Immunantwort maßgeblich sind.

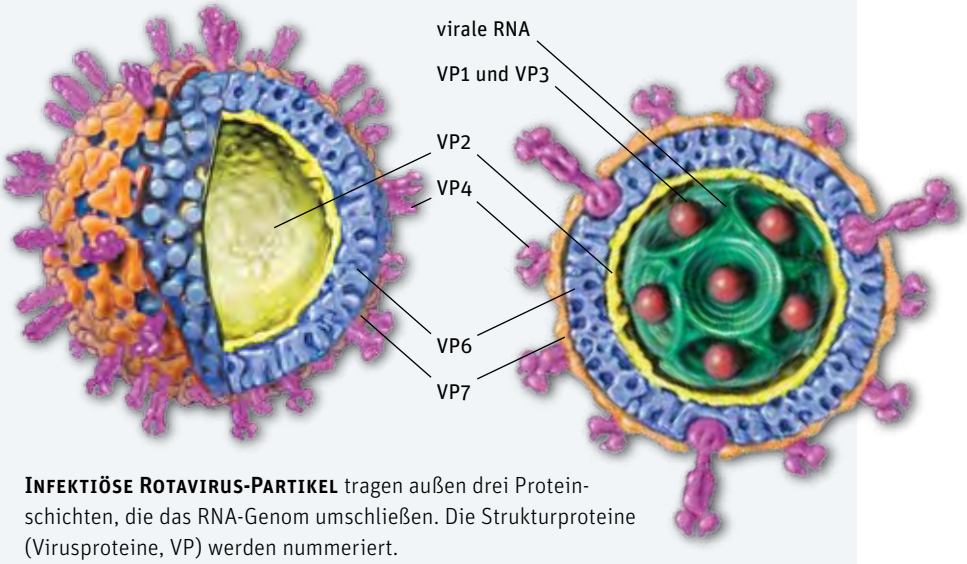
Sanfte Viren zur Immunisierung

Die einzelnen Proteine kommen in mehreren Varianten vor. Bei jedem Virusstamm sind jeweils andere Proteinvarianten miteinander kombiniert. Infizieren zwei verschiedene Stämme dieselbe Zelle, können sich die Gensegmente neu mischen und damit auch die Proteinvarianten sich neu sortieren. Obwohl so ständig neue Kombinationen (neue Virusstämme, Reassortanten) der Erbanlagen auftreten, entstehen nur selten wirklich durchsetzungsfähige neue Virusversionen. Nimmt man zum Beispiel nur die VP7- und VP4-Varianten, so kennen die Forscher allein hierfür 42 Rotavirus-Stämme mit jeweils einer einzigartigen Zusammenstellung dieser beiden Proteine. Davon sind aber nur vier oder fünf medizinisch von Belang. Diese paar Stämme verursachen über 90 Prozent aller menschlichen Rotavirus-Infektionen in der Welt.

Um einen Impfstoff zu finden, nutzten Kapikian und sein NIH-Kollege Harry Greenberg das Phänomen der Neukombination aus. Sie entwickelten ein Laborverfahren, bei dem neu zusammengesetzte Viren entstehen, an denen Menschen nicht erkranken und die trotzdem veranlassen, dass eine ausreichende Immunität aufgebaut wird. Zunächst schufen die Forscher Viren, bei denen alle Gene bis auf eines von einem Rhesusaffen-Rotavirus kamen. Das Gen für das VP7-Protein stammte in drei Fällen von verschiedenen Humanvirusstämmen, im vierten Fall von einem Affenvirus, dessen VP7-Variante der eines menschlichen Stammes stark ähnelt. Diese vier Versionen des Erregers gemeinsam bildeten den Impfcocktail »RotaShield«, eine so genannte tetravalente Vakzine. Sie sollte Kinder vor den vier häufigsten humanen Rotavirus-Stämmen schützen.

Im Jahr 1991 erhielt die Firma Wyeth Pharmaceuticals (damals Wyeth Ayerst) von der amerikanischen Nahrungs-und Arzneimittelbehörde FDA die Genehmigung, den Impfstoff herzustellen und zu testen. In den nächsten fünf Jahren erfolgten in den USA, Finnland und Venezuela umfangreiche klinische Studien, um die Sicherheit der Vakzine, ihre Schutzkraft und die Dauer des Impfschutzes zu prüfen. Nachdem die FDA im Jahr 1998 die Zulassung erteilt hatte, empfahlen zuständige Stellen in den USA eine Routine-Impfung mit RotaShield für alle amerikanischen Kinder. So wurden in den folgenden neun Monaten über 600 000 Jungen und Mädchen damit geimpft. Für uns Forscher war das eine aufregende Zeit. ▷

Die Struktur des Killers



Infektiöse Rotavirus-Partikel tragen außen drei Proteinschichten, die das RNA-Genom umschließen. Die Strukturproteine (Virusproteine, VP) werden nummeriert.

Die äußere Schicht bildet VP7. Sie ist mit »Dornen« aus VP4 gespickt. Beide Proteine rufen beim Wirt eine gegen den Erreger wirksame Immunantwort hervor, weswegen sie bei Impfstoffen eine besondere Rolle spielen. VP4 erleichtert außerdem das Eindringen des Erregers in Wirtszellen – ebenso seine Zerlegungsprodukte VP5 und VP8 (hier nicht gezeigt), die im Wirt auftreten.

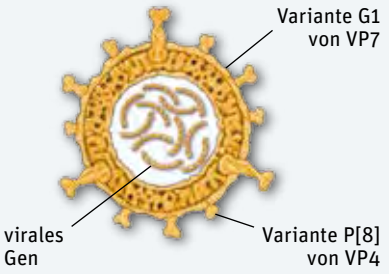
Die zweite Schicht besteht aus VP6. Sie ist für die Gentranskription, somit die Herstellung neuer Virusproteine, in infizierten Zellen vonnöten. Das Strukturprotein VP2 bildet die innere Schicht.

Bei VP1 und VP3 handelt es sich um Enzyme, die zum Kopieren der Virusgene gebraucht werden. Das Virusgenom umfasst elf Segmente (Einzelstücke) doppelsträngiger RNA. Sie liegen dicht aufgerollt in der Mitte. Diese Segmente kodieren sowohl für Virusproteine (VP) als auch für Nichtstrukturproteine (NSP). Dazu gehört das Toxin NSP4. Es wird produziert, nachdem das Virus in die Zelle eingedrungen ist.

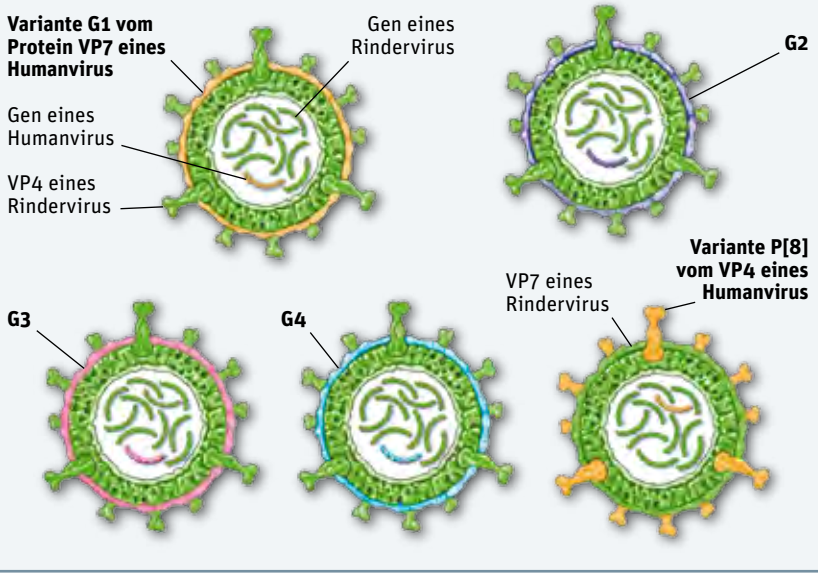
Endlich Impfstoffe

In umfangreichen klinischen Studien erwiesen diese beiden Lebendimpfstoffe ihr hohes Schutzpotenzial und ihre Verträglichkeit für Säuglinge und Kleinkinder.

»Rotarix«, von GlaxoSmithKline, basiert auf einem abgeschwächten (attenuierten) menschlichen Rotavirus-Stamm, der die Krankheitssymptome nicht mehr hervorruft, sich aber im Darm noch genügend vermehrt, um eine Immunreaktion zu erzeugen. Nachweislich schützt dieser Impfstoff gegen eine Anzahl Rotavirus-Stämme – gegen die meisten Serotypen –, die den Menschen infizieren.



RotaTeq, entwickelt von Merck & Co, wird in Europa von Sanofi Pasteur vertrieben. Dieser Impfstoff enthält fünf verschiedene neu kombinierte Viren. Dazu wurden jedes Mal zehn Gene aus einem Rinder-Rotavirus (grün in der Mitte) mit einem einzelnen Gen eines Humanvirus kombiniert. Die fünf Gene von Humanviren und ihre zugehörigen Proteine sind hier jeweils andersfarbig dargestellt. Es handelt sich also im Prinzip um Rinderviren mit verschiedenen Humanviruskomponenten. Menschen werden von dem Rindervirus nicht krank. Die spezielle Aufbereitung schützt dennoch vor den vier häufigsten humanen Rotavirus-Stämmen.



ANDREW SWIFT

▷ Tests an mangelernährten Kindern in Entwicklungsländern fehlten zwar noch. Uns war bekannt, dass dort andere Schluckimpfungen mit Lebendvakzinen im Ganzen nicht so gut anschlagen – etwa gegen Kinderlähmung oder Cholera. Der neue Impfstoff war für viele dieser Länder auch noch zu teuer. Doch wir freuten uns, denn endlich konnten wir dem Rotavirus den Kampf ansagen.

Wir hatten zu früh triumphiert. Im Jahr 1999 trat in mehreren Fällen binnen zwei Wochen nach der Impfung eine schwere Komplikation auf, eine so genannte Invagination: Ein Abschnitt des Darms stülpte sich in den angrenzenden Teil hinein, was die Darmpassage verschließt und oft extrem schmerzhaft ist. Erfolgen medizinische Gegenmaßnahmen nicht rasch genug, kann das Kind sterben. Die CDC verlangten, das Impfprogramm sofort zu stoppen. Fünfzehn Jahre Entwicklungsarbeit und mehrere hundert Millionen Dollar Forschungskosten schienen verloren.

Erst hieß es, einer von 2500 Impflingen sei hierfür gefährdet – eine gewiss nicht hinnehmbar hohes Risiko. Späteren Untersuchungen zufolge lag die Rate niedriger, bei 1 : 11 000. Auch fand Lone Simonsen von den NIH einen Alterszusammenhang: Für Säuglinge unter drei Monaten bestand weniger Gefahr als für ältere Kinder. Würde man den Impfstoff nur in den ersten drei Lebensmonaten anwenden, sänke die Wahrscheinlichkeit für eine Darmeinstülpung vielleicht sogar um dem Faktor Zehn – auf 1 : 30 000.

Heikle und engagierte Diskussionen folgten. Wie sollten die Verantwortlichen angesichts dieser Zahlen entscheiden? War das Impfrisiko in einem Land wie den USA hinnehmbar, wo zwar viele Kinder wegen einer Rotavirus-Infektion stationär behandelt werden müssen, daran aber selten sterben? War es eher in Entwicklungsländern akzeptabel, wo dieser Krankheit jedes zweihundertste Kind erliegt? Kämen 150 gerettete Kinder auf einen Fall von Invagination – wäre das zu rechtfertigen? Oder wäre dieser Preis zu hoch?

Vor allem ging es um die Entscheidung, ob es nicht sogar unethisch wäre, den Impfstoff nicht einzusetzen, obwohl damit jährlich eine halbe Million Menschenleben bewahrt werden könnten. Andererseits ließ sich argumentieren, es sei auch unethisch, in armen Ländern eine Vakzine zu vertreiben, die für die USA als zu gefährlich gilt.

CDC und WHO beriefen eine Konferenz mit Gesundheitspolitikern aus den Entwicklungsländern ein. Nach hitzigen Debatten beugte sich die Wissenschaft den Argumenten der Politik. Ein hoher indischer Beamter sagte dazu: »Ich weiß, der Impfstoff könnte in meinem Land 100 000 Kindern das Leben retten. Doch beim ersten Fall von Darmverschluss würde man mir nicht verzeihen, dass ich bei uns ein Produkt eingeführt habe, das in den USA zurückgerufen wurde.«

Die Forscher fragten sich, warum jener Impfstoff wohl in seltenen Fällen solche Komplikationen machte. Bei einer Rotavirus-Infektion besteht sonst an sich kein erhöhtes Risiko für eine Invagination. Waren möglicherweise die verwendeten Affenviren daran Schuld und nicht die Schluckimpfung mit Lebendmaterial als solche?

Zwei Impfstoffhersteller machten sich erneut an die Arbeit (siehe Kasten oben). GlaxoSmithKline war wieder dabei. Diesmal nahm die Firma einen einzigen abgeschwächten Rotavirus-Stamm vom Menschen und entwickelte damit eine so ge-

nannte monovalente Vakzine, »Rotarix«. Die Wissenschaftler waren zuversichtlich, dieses Präparat würde – wie anscheinend normale menschliche Rotaviren auch – kein Invaginationsrisiko bergen. Um so sicher wie möglich zu gehen, sollten damit nur Kinder im Alter zwischen sechs und 13 Wochen geimpft werden.

Zur gleichen Zeit entwickelte die amerikanische Firma Merck & Co (nicht zu verwechseln mit Merck KGaA in Darmstadt) eine – pentavalente – Vakzine aus fünf künstlichen Viren, und zwar fünf verschiedene Kombinationen (Reassortanten) aus Rinder- und menschlichen Rotaviren. Der Impfstoff namens »RotaTeq« sollte vor den hauptsächlichen Rotavirus-Stämmen schützen. Die Merck-Forscher überlegten, dass die Rinder-Rotaviren für Kinder weniger gefährlich sein müssten als das bewusste Affenvirus, weil sie sich in der menschlichen Darmschleimhaut schlechter vermehren. Sie erzeugen auch kein leichtes Fieber wie oft der Affenvirus-Impfstoff. Zudem sollten damit nur sechs bis zwölf Wochen alte Kinder behandelt werden.

Ungewohnte Vorsicht

Nach Rücksprache verlangte die FDA, dass die klinischen Tests mit den beiden neuen Vakzinen umfangreich genug angelegt sein müssten, um selbst die kleinsten Risiken aufzudecken. So sollten in der ersten Testphase jeweils 60 000 Kinder teilnehmen. Damit wurden diese Sicherheitsprüfungen zu den größten und teuersten, die es bis dahin vor einer Zulassung eines Impfstoffs je gegeben hatte. Beide Firmen gingen ein hohes finanzielles Wagnis ein. Sollte ihr neuer Impfstoff nur geringfügig mehr Darminvaginationen verursachen als sonst, würden die Tests sofort eingestellt.

Heute sieht es so als, als hätte sich der Einsatz gelohnt. Die klinischen Studien für beide Rotavirus-Vakzinen sind abgeschlossen und die Ergebnisse in beiden Fällen ermutigend. Die Impfung vermittelt zu 85 bis 98 Prozent Schutz vor einer schweren Rotavirus-Infektion. Vor allem trat die gefürchtete Darmeinstülpung bei den Impflingen nicht häufiger auf als bei anderen Kindern.

Rotarix wurde hauptsächlich in Lateinamerika geprüft. Seit 2004 wurde der Impfstoff in über 65 Ländern zugelassen, im Februar 2006 auch in der EU. RotaTeq sollte zunächst vordringlich US-Standards genügen. Die Vakzine ist seit 2006 in den USA, Kanada und Mexiko zugelassen, ebenso in der EU. Weitere Zulassungen sollen folgen, und in Nicaragua läuft ein flächendeckendes Impfprogramm.

Außerdem arbeiten Impfstoffhersteller in den Entwicklungsländern an eigenen Rotavirus-Vakzinen, die sich besonders gegen Virusstämme vor Ort richten. Kleinere Firmen dürfen sich das durchaus zutrauen, denn hierzu genügen konventionelle Zellkulturmethoden. Eine ausgefeilte Gentechnik benötigt man nicht. Rund ein Dutzend Firmen in Indien, China, Indonesien und Brasilien entwickelt Rotavirus-Schluckimpfungen. Ein chinesisches Produkt ist bereits auf dem Markt.

Die Hoffnung wächst, die Gefahr schwerer Rotavirus-Infekte mit den neuen Impfstoffen bald eindämmen zu können. Bis dahin wird allerdings noch manches zu tun sein. Viele Entscheidungsträger in Entwicklungsländern haben noch nie von Rotaviren gehört. Um Impfprogramme in ihrem Land zu akzeptieren und durchzusetzen, benötigen sie Zahlen. In über vierzig Ländern liefern entsprechende Beobachtungsprogramme jetzt erste Daten. Die Durchführung obliegt Joseph Bresee und Umesh D. Parashar von den CDC, zusammen mit der WHO und dem Programm für geeignete Gesundheitstechnologie.

Außerdem ist noch nicht nachgewiesen, dass diese Schluckimpfungen auch in den ärmsten Ländern wirksam und sicher sind. Und nicht zuletzt geht es um einen dort erschwinglichen Preis für Impfstoffe, deren Entwicklung jeweils einige hundert Millionen Dollar kostete. In der Welt kommen jährlich 135 Millionen Kinder zur Welt, die versorgt werden müssten.

Doch es geht vorwärts. Vielleicht wird diese häufige Todesursache kleiner Kinder in armen Regionen in zehn Jahren beseitigt sein – dank einer medizinischen Maßnahme, die heute zu den kostengünstigsten zählt. Dass Impfungen dieses Ziel erreichen können, darin sind viele Experten zuversichtlich. Dann würden Rotaviren ihr Schicksal mit den Erregern von Kinderlähmung, Pocken und Diphterie teilen – Krankheiten, die ausgerottet beziehungsweise an den Rand gedrängt werden konnten. Gewonnen hätten die Epidemiologen, wenn die meisten Menschen diese Infektionskrankheit selbst gar nicht mehr kennen. ◁

MERCK & CO.

Der kleine Andrew, eines der vielen Kinder, die an der Erprobung des Impfstoffs RotaTeq teilnahmen, schaut sich genau an, was er da schlucken soll.

Roger I. Glass ist seit 2006 Direktor des Fogarty International Center der Nationalen Gesundheitsinstitute der USA in Bethesda (Maryland) und stellvertretender Direktor für internationale Programme. Vorher leitete er an der Emory-Universität in Atlanta (Georgia) am Zentrum für Krankheitskontrolle und -prävention (CDC) die Abteilung für virale Gastroenteritiden und hatte dort eine Professur für Kinderheilkunde und internationales Gesundheitswesen. Er berät unter anderem die Weltgesundheitsorganisation (WHO) und die Globale Allianz für Impfstoffe und Immunisierung. Glass dankt Philip R. Dormitzer von der Harvard-Universität für seine Mitarbeit bei den Abbildungen dieses Artikels.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Safety and efficacy of an attenuated vaccine against severe rotavirus gastroenteritis. Von G. Ruiz-Palacios et al. in: New England Journal of Medicine, Bd. 354, S. 11, 5. Jan. 2006

Safety and efficacy of a pentavalent human-bovine (WC3) reassortent rotavirus vaccine. Von T. Vesikari et al. in: New England Journal of Medicine, Bd. 354, S. 23, 5. Jan. 2006

The future of rotavirus vaccines: A major setback leads to new opportunities. Viewpoint. Von R. Glass et al. in: Lancet, Bd. 363, Heft 9420, S. 1547, Mai 2004

Global illness and deaths caused by rotavirus disease in children. Von U. D. Parashar et al. in: Emerging Infectious Diseases, Bd. 9, Heft 5, S. 565, Mai 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/864278.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Die unvollendete Revolution, unvollendet erzählt

Die kenntnisreiche Darstellung eines spannenden Themas leidet an mangelnder begrifflicher Klarheit.

Die Kompetenz des Autors in Sachen Albert Einstein ist über jeden Zweifel erhaben. Jürgen Renn ist Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin, Autor und Koautor zahlreicher Publikationen über den Schöpfer der Relativitätstheorie, insbesondere der »Einstein Annalen Papers«, und er wurde bekannt durch die Ausstellung »Albert Einstein – Ingenieur des Universums«, die im Einstein-Jahr 2005 in Berlin stattfand. In der Tat kommt man bei der Lektüre auf seine Kosten, wenn man sich tiefer mit dem Werk des genialen Physikers befassen möchte.

Ich habe vieles gelernt, was ich vorher nicht wusste. Renn zeichnet kenntnisreich den Weg des kleinen Patentamtsangestellten zur Speziellen Relativitätstheorie vor dem Hintergrund der Entwicklung der Physik seiner Zeit nach und zeigt, auf welch mannigfache Weise die scheinbar so heterogenen Beiträge des Jahres 1905 untereinander verwoben sind, sodass sie als Teile eines Ganzen erscheinen. Im zweiten Teil des Buchs geht es um die verschlungenen Pfade und Irrwege, die Einstein zur Allgemeinen Relativitätstheorie führten. Auch dies ist eine faszinierende Geschichte. Man sieht, wie Einstein mühsam und mit enormer Hartnäckigkeit von einem konstruktiven Irrtum zum nächsten voranschreitet, bis sich schließlich alles in das bekannte Theoriengebäude fügt.

Trotzdem bin ich nach der Lektüre des Buchs nicht so recht glücklich. Das Wiedersehen mit amateurmarxistischen Floskeln der 1970er Jahre – »vom Kopf auf die Füße stellen«, »geschuldet« – hat noch nostalgische Gefühle ausgelöst, einige Stilblüten und Leerformeln eher Erheiterung. Aber bei der Mathematik, die bei einem Thema wie der Allgemeinen Relativitätstheorie kaum zu vermeiden ist, wird es mühsam. Anscheinend mag der Autor sie nicht. Wohlgemerkt, mir ist klar, dass in der theoretischen Physik die Sprache der Mathematik eher ein Alltagsdialekt ist und man sich mit einem notwendigen Minimum an Präzision zufriedenzugeben hat. Aber selbst dieses Minimum vermisst man in dem Buch.

Der Begriff der Metrik wird wie folgt eingeführt (S. 202): »Während im gewöhnlichen euklidischen Raum eine Metrik gewählt werden kann, die die unmittelbare physikalische Bedeutung der räumlichen Distanz zwischen zwei Punkten hat, lässt sich in Minkowskis vierdimensionaler Raumzeit mit Hilfe der dortigen Standardmetrik über die Bestimmung räumlicher und zeitlicher Abstände hinaus in konziser Weise die Kausalstruktur der Physik gemäß der speziellen Relativitätstheorie darstellen.« Kein Zweifel, der Stoff ist schwer. Aber solche Formulierungen machen ihn schwerer, als er ist, und für den Leser, der »sich noch ein paar Schulkenntnisse in Physik bewahrt hat und genügend Geduld für die schwierige Materie mitbringt« (Vorwort), praktisch unzugänglich. Ausgerechnet die beiden zentralen Begriffe »Metrik« und »Divergenz« haben in der Fachsprache je zwei deutlich verschiedene Bedeutungen; aber Renn wirft die beiden Bedeutungen von »Metrik« hoffnungslos durcheinander und verwendet von »Divergenz« stillschweigend diejenige, die man in der Schule gerade nicht lernt.

Der Autor geht auch auf die Geschichte von Hilberts Druckfahnen ein (vergleiche meine Besprechung in Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 100), allerdings gegenüber früheren Verlautbarungen recht zurückhaltend. Wenn er jedoch andeutet, Einstein habe Emmy Noethers wichtiges und berühmtes Theorem vorweggenommen, dürfte er mit der – verständlichen – Sympathie des Historikers für den Gegenstand seiner Untersuchungen zu weit gehen.

Die wissenschaftshistorischen Theorien des Autors kranken an mangelnder Klarheit der Begriffe und kühnen Verallgemeinerungen: Was hat die heliozentrische Theorie des Kopernikus mit der Ablösung der Phlogistontheorie und der Relativitätstheorie an »typischen« Merkmalen gemeinsam, dass es sinnvoll wäre, den Begriff des »Kopernikus-Prozesses« einzuführen und ihm eine zentrale Rolle zuzuweisen, ohne dass er je wirklich definiert würde?

Renn diagnostiziert Defekte im Wissenschaftsbetrieb, die weder neu sind noch in der beschriebenen Schärfe auftreten – die Rolle von Hierarchien, Karrierestrukturen, den Warencharakter des Wissens und andere –, und bietet enttäuschend hausbackene Rezepte zur Abhilfe an: die elektronischen Medien als Träger einer neuen Wissenskultur, Interdisziplinarität, Verantwortung des Wissenschaftlers, Reflexion, Wissensintegration und -vernetzung. Wem sind eigentlich solche Ideen noch nicht gekommen?

Ärgerlich sind die häufigen Ausfälle des Autors gegenüber denjenigen seiner Kollegen, die sich der mühsamen Editionsarbeit widmen. Ich weiß, dass diese Arbeit frustrierend ist, dass es immer schwieriger wird, sie zu finanzieren, und dass sie immens wichtig ist – jedenfalls für mich. Man findet in dem Buch immer wieder böse und ungerechte Charakterisierungen, so zum Beispiel auf S. 28: »… investieren Förderorganisationen, Universitätsverlage und Akademien immer noch Millionen in Herausgeber, die wenig herausgeben, und in Editionsprojekte, die mehr und mehr zu einem Flaschenhals der Forschung geworden sind.« So schlecht, wie Renn die Editoren hier macht, sind sie sicherlich nicht.

Das Buch enthält wichtige und interessante Einzelheiten über Einsteins Weg zu seinen Theorien. Allerdings muss man diese Einzelheiten aus langen schwülstigen Sätzen und ungenauen Formulierungen herausdestillieren. Zur Physik selbst gibt es andere, lesbare Bücher in großer Zahl.

Ulrich Eckhardt

Der Rezensent ist Professor für Mathematik an der Universität Hamburg.

Jürgen Renn
Auf den Schultern von Riesen und Zwergen
Einsteins unvollendete Revolution
Wiley-VCH, Weinheim 2006.
364 Seiten, € 24,90

Nur der echte Turm ist schöner

Die Konstruktionszeichnungen des Gustave Eiffel wurden neu aufgelegt – in Originalgröße.

Welch eine seltsame Idee: Da skizzieren im Jahr 1884, also zu einer Zeit, als es noch keinen Stahlbeton gibt, die beiden Chefingenieure einer auf den Bau von Brückenpfeilern spezialisierten Firma einen Turm: einen großen Stahlmast mit vier an der Basis gespreizten und in der Spitze aufeinander zulaufenden Stützen, die untereinander durch regelmäßig angebrachte Querträger verbunden sind. Ihr Chef, Gustave Eiffel, ist mit dem Entwurf nicht einverstanden, lässt seine Leute aber weiterarbeiten.

Fünf Jahre später, 1889 zur vierten Weltausstellung in Paris, wird das Publikum mit einem höchst eleganten und Aufsehen erregenden Bauwerk konfrontiert: dem später so genannten Eiffelturm. Mit über 1000 Fuß Höhe durchbrach er eine Art Schallmauer der Konstrukteurstechnik: Er war das höchste jemals von Menschen errichtete Gebäude, eine Ingenieurleistung sondergleichen.

Im Jahre 1900 sind Eiffel und »sein« Turm bereits zur Legende geworden. Wieder findet die Weltausstellung in Paris statt, wieder ist »la Tour« eine der Hauptattraktionen. In einer privaten Auflage von 500 Stück gibt Eiffel für Freunde und Geschäftskollegen ein großformatiges Buch heraus; es enthält 47 Tafeln sowie zahlreiche Fotografien vom Bau des Turms, zudem Ausblicke von dessen Aussichtsplattform auf die Stadt.

Im Oktober 2006 schließlich bringt der Taschen-Verlag diese Publikation als Faksimile neu heraus. Bertrand Lemoine, Direktor der Architekturschule von Paris-La Villette und Spezialist für Architekturgeschichte, erklärt in einem vielsprachig abgedruckten Text das Buch, seinen Herausgeber und die Geschichte des Turms; zusätzliches Fotomaterial von der Turmbaustelle lockert die Darstellung auf.

Kernstück des Werks sind die großformatigen (53 mal 37,5 Zentimeter), doppelseitigen Tafeln, die jeweils zahlreiche einzelne Grafiken enthalten. Es sind insgesamt so viele, dass nicht einmal der Verlag die genaue Anzahl weiß: Aufrissdiagramme, Standortpläne der Weltausstellung, Aufzeichnungen zur Bodenbeschaffenheit und zu den Aushubarbeiten, statische Berechnungen, Zeichnungen von den Stützgerüsten und natürlich zu jedem einzelnen technischen Detail einschließlich Aufzügen und Restaurants. Ein Baumeister könnte das Bauwerk am nächsten Tag in Auftrag geben.

Der Band beeindruckt jeden, der ihn zur Hand nimmt; doch profitieren werden von ihm hauptsächlich Interessierte aus der Baubranche, Ingenieure und Architekten: Für Hochschulbibliotheken erscheint er obligatorisch, für Eiffelturm-Fans ein Muss. Dieses Kompendium ist ein Kunstwerk für sich, das immer wieder zur Betrachtung der erstaunlichen Konstruktionen einlädt. Die historischen Zeichnungen und Fotografien sind ein besonderes Pläsir und werden in Zukunft sicher zu weiteren Publikationen dienen.

Nur der persönliche Ausblick von den Etagen des Turms – Arm in Arm zu zweit – ist schöner.

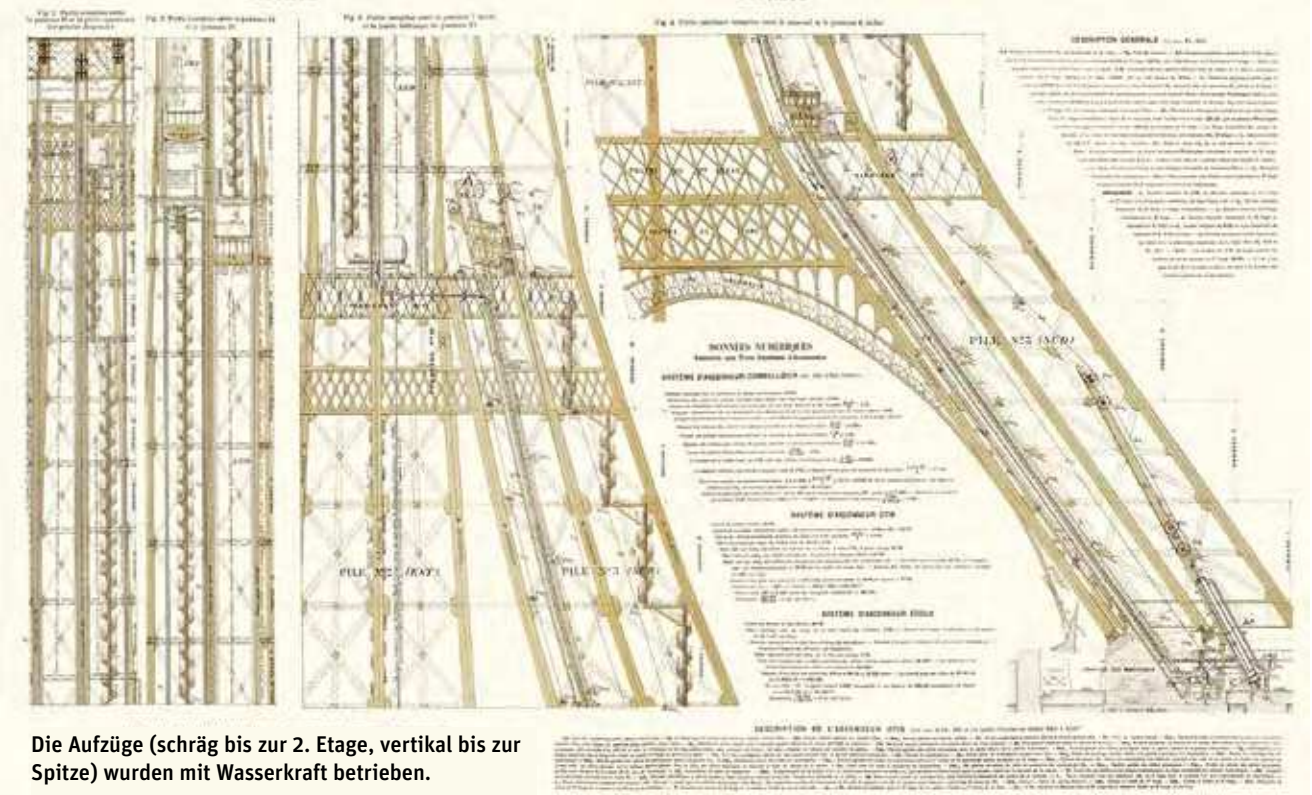
Frank G. Gerigk

Der Rezensent ist Diplomgeologe und freier Redakteur mit Themenschwerpunkt Baubranche. Er lebt in Leinfelden-Echterdingen.

Gustave Eiffel

La Tour de 300 Mètres

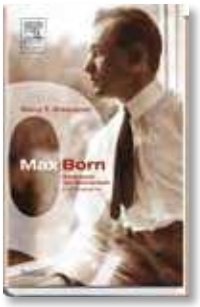
Taschen, Köln 2006.
Text in Englisch, Deutsch, Französisch, Spanisch, Italienisch, Portugiesisch, Niederländisch, Japanisch.
160 Seiten, € 99,99



Die Aufzüge (schräg bis zur 2. Etage, vertikal bis zur Spitze) wurden mit Wasserkraft betrieben.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Die Heimkehr des vertriebenen Sohnes



Max Born, der Lehrer Heisenbergs und Oppenheimers, der von den Nazis vertrieben wurde und dem lange der gebührende Ruhm versagt blieb, wird nun endlich durch eine umfassende Biografie geehrt.

Wer begründete die Quantenmechanik? Da fallen einem wohl zuerst Erwin Schrödinger (1887–1961) und Werner Heisenberg (1901–1976) ein, der eine mit der nach ihm benannten Wellengleichung, der andere mit der Unbestimmtheitsrelation, beide 1932 und 1933 mit Nobelpreisen geehrt. Viel weniger bekannt ist die Rolle von Heisenbergs Lehrer Max Born (1882–1970). Born führte nicht nur 1926 den Begriff Quantenmechanik ein, sondern lieferte die mathematische Grundlage für das so genannte Heisenberg-Bild der Quantenphysik. Bei diesem Formalismus steckt die Physik in zeitabhängigen Observablen, das heißt in beobachtbaren Größen wie Ort und Impuls. Heisenberg fand nun heraus, dass diese Größen in der Quantenphysik durch nichtkommutative Größen zu beschreiben sind.

Gewöhnliche Zahlen sind kommutativ, das heißt, es kommt, wenn man sie multipliziert, nicht auf die Reihenfolge an. Was für ungewöhnliche mathematische Objekte sind diese nichtkommutativen Größen? Die Antwort gab Max Born, der Mathematiker unter den Quantenphysikern: Es sind Matrizen. Bei solchen zweidimensionalen Anordnungen von Zahlen in Zeilen und Spalten macht es tatsächlich einen Unterschied, wie man sie multipliziert. Das drückte Born im Juli 1925 mit der Matrizenformel $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = (h/2\pi i)\mathbf{I}$ aus, die heute auf seinem Grabstein in Göttingen steht; darin bezeichnet $\mathbf{p}$ den Impuls, $\mathbf{q}$ den Ort, h das Planck'sche Wirkungsquantum und $\mathbf{I}$ die Einheitsmatrix. Heisenbergs berühmte Unbestimmtheitsrelation ist eine Folge dieser Formel. Die »Dreimännerarbeit« von Max Born, Werner Heisenberg und Pascual Jordan, erschienen in der »Zeitschrift für Physik« 1926, begründete die Matrizenmechanik, die aber später nur noch mit Heisenberg identifiziert wurde.

Max Born im Alter von 60 Jahren

Eine alternative – und wie sich bald zeigte, äquivalente – Formulierung der Quantenmechanik ist das Schrödinger-Bild. Dabei steckt die Physik in der zeitabhängigen Schrödinger'schen Wellenfunktion ψ. Auch zu diesem Formalismus leistete Born einen wesentlichen Beitrag, indem er die Wellenfunktion als »Wahrscheinlichkeitswelle« interpretierte: Der Wert dieser Funktion gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Zustandsmessung ein bestimmtes Ergebnis hat. Damit präzisierte Born den statistischen Charakter der Quantenmechanik. Die Zustandsfunktion ψ gehorcht zwar der deterministischen Schrödinger-Gleichung, aber der Zustand selbst ist nicht eindeutig definiert, sondern umfasst die Gesamtheit aller mehr oder weniger wahrscheinlichen Messresultate.

Born – für seinen Mathematiker-Kollegen Norbert Wiener »der bescheidenste Gelehrte, den ich kenne« – litt zeit seines Lebens darunter, dass sein Beitrag zur Quantenphysik unterschätzt wurde, und empfand die Verleihung des Nobelpreises 1954 als späte Genugtuung. Noch viel länger hat es gedauert, bis diesem »Baumeister der Quantenwelt« eine repräsentative Biografie gewidmet wurde. Die amerikanische Autorin Nancy Greenspan verfolgt fast taggenau das Schicksal des stillen Gelehrten und anregenden Lehrers, aus dessen Unterricht neun Nobelpreisträger hervorgingen.

Wie alle Quantenphysiker war Born, wenn auch nur indirekt, mit dem Problem der Atombombe konfrontiert. In Göttingen gehörte zu seinen Schülern 1926/27 Robert Oppenheimer, der spätere Leiter des Manhattan-Projekts und »Vater der Bombe«. Born hatte damals Mühe, Oppenheimers Wunderkind-Allüren zu ertragen, gab aber seiner Dissertation die Bestnote und entwickelte mit ihm die »Born-Oppenheimer-Näherung« für die Schrödinger-Gleichung von Molekülen.

Später, im Jahr 1938, promovierte auch der »Atomspion« Klaus Fuchs bei Born. Fuchs arbeitete anschließend am britischen und amerikanischen Bombenprogramm mit; da er im nuklearen Monopol des Westens eine Gefahr für den Weltfrieden sah, lieferte er der Sowjetunion geheime Daten zur Physik der Atombombe.

Born entstammte dem deutschen Bildungsbürgertum; dass er jüdischer Herkunft war, spielte für ihn erst eine Rolle, als die Nazis die Universitäten mit ihrem rassistischen Terror überzogen. Born musste emigrieren und fand schließlich in Edinburgh eine akademische Heimat. Verwandte und Freunde wurden in deutschen Konzentrationslagern umgebracht. Darum konnte Albert Einstein, mit dem Born eine lebenslange Freundschaft unterhielt, nicht begreifen, dass Born dennoch nach dem Krieg nach Deutschland heimkehrte, »ins Land der Massenmörder«, wie Einstein ihm schrieb.

Heikel war zeitweise auch Borns Verhältnis zu Heisenberg, über den er in einem privaten Brief Ende 1947 urteilte: »Seine Lebensphilosophie ist zweifellos von Nazigedanken etwas infiziert … Er bedauert anscheinend mehr, dass sich die Deutschen nicht als die Stärksten erwiesen haben, als das, was wir für die traurigen und bedauerlichen Dinge halten.«

Trotz allem kehrte Born heim, um »zu helfen, für eine geistige Erneuerung Deutschlands zu arbeiten«. In seinen späten Jahren engagierte er sich als ein führendes Mitglied der »Göttinger Achtzehn« – darunter auch Heisenberg – gegen die atomare Bewaffnung der Bundesrepublik und für allgemeine Abrüstung.

Heute sind Schulen und Straßen in seiner Heimat nach ihm benannt. Die deutsche Ausgabe dieser Biografie vollendet die Heimkehr des vertriebenen Sohnes.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Nancy T. Greenspan
Max Born – Baumeister der Quantenwelt
Eine Biographie

Aus dem Englischen von Anita Ehlers.
Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag, München 2006. 396 Seiten, € 28,–

Wissen aus erster Hand

Im Handel erhältlich!

STERNE UND WELTRAUM 3/2007

Sterne und Weltraum bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde gefesselt sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das faszinierende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- Dynamischer Mars – Neue Ansichten des Roten Planeten
- Pyramiden – Wegweiser zu den Sternen?
- String-Theorie – Die Suche nach den Fundamenten des Kosmos
- **Inkl. CD mit Exklusivdaten vom Web-Portal Einstein-Online!**

Sterne und Weltraum kostet € 7,60 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben/Jahr) für € 81,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 60,–) zu beziehen.

Ab 06.03.2007 im Handel erhältlich!

GEHIRN&GEIST TRAINER 01/2007

Das neue Gehirn&Geist-Sonderheft steht unter dem Motto »Gehirntraining für helle Köpfe«! Exklusiv für diesen »Trainer« verfasste Beiträge renommierter Berater und Coachs helfen Ihnen, Ihr Denkorgan dauerhaft in Schwung zu halten. Themen sind unter anderem:

- Wie Sie die alltägliche Informationsflut in den Griff bekommen
- Die besten Tricks der Gedächtnisexperten
- Ärger und Stress besiegen – mit Do-it-yourself-Akupressur
- Andere Menschen sicher einschätzen
- So werden Sie schlagfertiger

Der **Gehirn&Geist** TRAINER 1/2007 erscheint am 06.03.07 im Handel und kostet € 3,90.

Im Handel erhältlich!

ASTRONOMIE HEUTE 3/2007

Ob Hobbyastronom oder begeisterter Himmelsforscher: **Astronomie Heute** nimmt Sie zehnmal jährlich mit auf eine faszinierende Entdeckungsreise durch die Wunderwelt des Weltraums. In der aktuellen Ausgabe finden Sie unter anderem folgende Themen:

- Gammastrahlungsausbrüche – Erde in Gefahr?
- Kosmische Zwillinge – Doppelsterne
- Teleskoptest: Vier Linsenfernrohre im Vergleichstest
- **Inkl. DVD mit 3 Beiträgen aus der Reihe Space-Files (Laufzeit: 30 Min.)**

Astronomie Heute kostet € 6,50 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (10 Ausgaben/Jahr) für € 56,– inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 50,–) zu beziehen.

Ab 09.03.2007 im Handel erhältlich!

DOSSIER »SUPERCOMPUTING«

In den letzten fünf Jahren hat sich die Szene der Höchstleistungsrechner noch dramatischer gewandelt als der schon sehr turbulente allgemeine Computermarkt. Die Rekordleistung von gestern ist gerade noch die Mindestanforderung von heute. Das Dossier »Supercomputing« bringt neuere, aktualisierte »Spektrum«-Beiträge zum Thema; die geschilderten Ideen werden voraussichtlich auch noch den nächsten Innovationswellen standhalten. Aus dem Inhalt:

- Die 500 schnellsten Computer der Welt
- Technische Innovationen: Photonische Computer, Morphware, Crossbars aus Nanodrähten
- Quantencomputer

Das DOSSIER »Supercomputing« erscheint am 09.03.07 im Handel und kostet € 8,90.

Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich! Eine Bestellmöglichkeit finden Sie auf dem Beihefter oder unter:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Leserservice
Telefon: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751 | service@spektrum.com

w w w . s p e k t r u m . d e

BIOLOGIE UND THEOLOGIE

Eine theologische Zoologie

Rainer Hagencord findet erstaunliche Übereinstimmungen zwischen biblischen und wissenschaftlichen Aussagen über die Tiere.

Wenn ein katholischer Theologe »verhaltensbiologische und theologische Argumente« in einem Buch versammelt, um »für eine neue Sicht der Tiere« zu plädieren, dann riecht das für einen Naturwissenschaftler zunächst nach einem freundlichen, gleichwohl abwegigen Übernahmeangebot. Zu unterschiedlich sind die Arbeitsmethoden von Naturwissenschaft und Theologie. Und die Versuche machtvoller Religionen wie des Christentums, Naturwissenschaftler in Sachen Natur zu belehren, sind zu spektakulär gescheitert, als dass man sich auf eine Wiederholung einlassen möchte.

Doch zum Glück für den Leser hat Rainer Hagencord keinerlei religiös begründete Resistenzen gegenüber wissenschaftlichen Fakten entwickelt. Mit dem christlichen Schöpfungsglauben (»Intelligent Design«) gegen die biologische Evolutionstheorie anzukämpfen ist nicht sein Ziel. Er will den Graben zwischen »Wissen« und »Glauben« weder künstlich vertiefen noch überbrücken, sondern vielmehr an längst vergessene gemeinsame Ursprünge erinnern, gewohnte Ansichten hinterfragen und neue Perspektiven eröffnen. Und der promovierte Theologe sowie studierte Biologe und Philosoph schreitet bei dieser interdisziplinären Gratwanderung selbst auf schwierigstem Terrain trittsicher voran.

Die Religion »stellt womöglich die einzige Eigenschaft dar, die [den Menschen] von seinen Mitgeschöpfen unterscheidet und zugleich in die Verantwortung verweist«, so Hagencord in seiner Einführung. Und von dieser Verantwortung gegenüber dem Tier handelt dieses anspruchsvolle Buch.

Hagencord will nichts Geringeres als eine »theologische Zoologie« entwerfen, in der nicht nur das Tier, sondern auch der Mensch »neu verortet« wird. Die »Frage nach dem Tier« sei nicht nur aus evolutionsbiologischer, sondern auch aus theologischer Sicht stets auf das Engste mit der »Frage nach dem Menschen« verbunden: »Ein Irrtum über die Geschöpfe mündet in ein falsches Wissen über Gott und führt den Geist des Menschen von Gott fort.« So sah es bereits Thomas von Aquin (1225 – 1274), dem Hagencord folgt.

Unsere vom Christentum geprägte Geistes- und Kulturgeschichte liefert in der Tat zahlreiche Belege dafür, dass mit der »Naturentfremdung« stets auch eine »Gottesentfremdung« und eine »Entfremdung des Menschen vom Ursprung seiner selbst« einhergegangen ist. Hagencords Diagnose lautet: Unsere westliche Zivilisation avancierte deshalb zum effizientesten Naturzerstörer aller Zeiten, weil sie ein irriges, wenn nicht gar pathologisches Verhältnis zu den Tieren und zur Natur insgesamt entwickelt hat. Doch Hagencord wäre ein schlechter Theologe, wenn er den Leser hoffnungslos in der Sackgasse dieses zweiten Sündenfalls stecken ließe. Und er wäre ein schlechter Biologe, wenn er nicht versuchen würde, das Tier sowohl im Kontext der »biblischen Anthropologie« als auch »der modernen Verhaltensbiologie« zu betrachten.

Ethisch, partnerschaftlich und mystisch

Diese Synopsis biblischer und wissenschaftlicher Aussagen über das Tier bringt denn auch erstaunliche Übereinstimmungen ans Licht, die einige gute »Argumente für eine neue Sicht der Tiere« liefern. Ermöglicht wurde eine solche Annäherung jedoch erst in den letzten Jahren, als die Wissenschaft sich endlich dazu bequemte, ein differenziertes Tierbild zu entwerfen. Anders als René Descartes (1596 – 1650) betrachtet man heutzutage Tiere nicht mehr nur als »seelenlose Automaten«, sondern schreibt ihnen zunehmend kognitive Fähigkeiten, emotionale Reaktionen und Ansätze einer Kulturfähigkeit zu. Dass derlei Einsichten durchaus die biblisch verbürgte Sonderstellung des Menschen als »Krone der Schöpfung« zu untergraben geeignet sind, irritiert den aufgeklärten Theologen Hagencord keineswegs. Dafür ist ihm die Abkehr vom radikalen Rationalismus eines Descartes viel zu wichtig.

Die Tiere, so argumentiert Hagencord in Anlehnung an Nikolaus von Kues (1401 – 1464), mussten das »Paradies« nicht verlassen; sie leben immer noch in jener »Gottunmittelbarkeit«, die der Mensch längst aufgegeben hat. Mit dem »Sündenfall« begann zwar ein für unser Menschsein notwendiger Emanzipationsprozess, doch dieser musste uns notgedrungen vom Tier entfremden – was jedoch keinesfalls den »ideengeschichtlichen Ausschluss« der Tiere aus der abendländischen Philosophie und Theologie zu rechtfertigen vermag.

Das neue Mensch-Tier-Verhältnis sollte nach Hagencord »ethisch, partnerschaftlich und mystisch« zugleich angelegt sein und eine neue »Schöpfungsspiritualität« begründen. Doch kann solch radikale Abkehr von jener verhängnisvollen Reduktion, die bislang alles tierliche und pflanzliche Leben auf diesen Planeten »zu Objekten menschlicher Verfügbarkeit« machte, überhaupt erwartet werden? »Diesseits von Eden« wohl kaum, mag der kritische Leser einwenden. Doch wäre gewiss schon viel gewonnen, wenn es zu einer Art einseitigem Waffenstillstand käme, der unseren Mitgeschöpfen eine nachhaltige Erholungspause und Überlebenschance gönnt.

Solch friedliche Koexistenz sei auch für das Verhältnis von Naturwissenschaft und Theologie zukunftsträchtig: Man hat zwar unterschiedliche Ausgangspositionen und geht auch getrennte Wege, kommt jedoch gelegentlich – wie hier bei der Neubewertung der Tiere – dennoch zu gleichen Erkenntnissen und Forderungen. Und die unüberbrückbare Kluft zwischen »Wissen« und »Glaube« wird dabei nicht mit irgendwelchen esoterisch anmutenden Phrasen verkleistert, sondern als strikte Aufgabenteilung begriffen: Für das Wie der Evolution ist die Naturwissenschaft zuständig, für das Warum die Theologie. Wer also nach einem höheren – übernatürlichen – Sinn seiner Existenz sucht, darf sich auf dem Markt der Sinnanbieter gern bei der Religion bedienen; und Hagencord preist seine Ware ohne aufdringliches Geschrei an.

Seine »fruchtbare Allianz von biblisch orientierter Theologie und Verhaltensbiologie« hat die berühmte Primatenforscherin und Naturschützerin Jane Goodall nicht nur tief beeindruckt, sondern auch zu einem einfühlsamen Vorwort inspiriert. Sie fasst die wichtigste Botschaft dieses empfehlenswerten Buchs wie folgt zusammen: »Der Mensch *ist* – wie jedes Geschöpf – lebendige Seele!«

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Rainer Hagencord
Diesseits von Eden
Verhaltensbiologische und theologische Argumente für eine neue Sicht der Tiere
Friedrich Pustet, Regensburg 2005.
254 Seiten, € 26,90

Mit Grips unterhalten

Abwechslungsreich und oft amüsant ist die Komposition zahlreicher kurzer, leicht verdaulicher Beiträge aus dem Fundus der Hirnforschung.

Braintertainment« – das klingt nach Neurowissenschaften light, angereichert mit allerlei künstlichen Aroma- und Süßstoffen, um das Lesefutter dennoch schmackhaft zu machen. Doch im Gegenteil: Das Ganze (ent-) hält mehr, als es verspricht. Ein Menü wird gereicht, mit 17 Gängen an der Zahl, und die meisten sind exquisites Futter fürs Hirn – vollwertig, ohne zu beschweren. Mit viel Humor und Witz gewürzt ist das Buch ein leichter Genuss. Titel taugen eben nur teilweise.

Zu Beginn nimmt Wulf Bertram, Arzt, Psychologe und wissenschaftlicher Leiter des Schattauer-Verlags in Stuttgart, den Laien mit auf einen »Rundgang durch die Hirnlandschaft«. Wer mehr wissen will, kann sich an kommentierten Literaturangaben orientieren. In der »Kleinen Neuroterminologie« wird man nicht mit einer Vokabelliste vom Ammonshorn bis zur Zirbeldrüse gelangweilt, sondern darf dem Terminologen bei der Arbeit über die Schulter schauen – und sich von der Begeisterung des Autors Axel Karenberg mitreißen lassen. Der entdeckt in den Bezeichnungen für Gehirnstrukturen einen »riesigen kulturhistorischen Speicher«. »Strukturähnlichkeiten zwischen der aus Ziegeln gemauerten Gewölbedecke, dem *fornix*, und der gekrümmten Abdeckung der mittleren Hirnkammer führten zum Fornix cerebri«, schreibt der Professor vom Kölner Institut für Geschichte und Ethik der Medizin. Viele Begriffe stammen aus dem Alltag, so zum Beispiel das Cingulum (Gürtel), das Putamen (Schale) und das Frenulum (Zügel).

Den »Humor ernst genommen« hat Barbara Wild von der Psychiatrischen Universitätsklinik Tübingen. Das Witzige am Witz ist, dass er häufig dort steckt, wo man ihn nicht vermutet – und das gilt auch für das Gehirn: Ein »Humorgebiet« scheint es dort nicht zu geben.

Dem großen Thema »Glück« widmet sich einer der Herausgeber des Buchs persönlich, der populäre Ulmer Psychiater und Publizist Manfred Spitzer. Wer das Kapitel liest, wird glücklich sein – ob der neuen Denkanstöße und gewonnenen Einsichten. Weshalb die glücklich machen? Weil Glück auch heißt, dass etwas eintritt, das besser ist als erwartet. Aber leider ist der Mensch offenbar nicht dafür ausgelegt, dauerhaft glücklich zu sein, sondern vielmehr, beständig danach zu streben. Wer Erinnerungen voll Glück behalten will, dem empfiehlt Spitzer, eine alte Regel zu beherzigen – freilich auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse: »Wenn es am schönsten ist, soll man aufhören.«

Geweckt werden Erinnerungen, gute wie schlechte, oft durch Gerüche und Geschmäcker. Der Erzähler in Marcel Prousts Roman »Auf der Suche nach der verlorenen Zeit« taucht seine Madeleine in Lindenblütentee und so selbst ab in die Kindheit, in der er dieses Gebäck jeden Sonntagmorgen auf diese Weise verspeiste. Die Autoren des lesenswerten Beitrags über das Wie und Warum des Geruchssinns liefern auch gleich »das morphologische Korrelat für das Phänomen: die direkte Verbindung des Riechkolbens mit dem Hippocampus«, jener Hirnstruktur, die für die Langzeitspeicherung von Gedächtnisinhalten eine entscheidende Rolle spielt.

Mehr sehens- als lesenswert ist das kurze Kapitel über optische Täuschungen – aber schauen Sie selbst!

Im »Epilog« kommentiert der Frankfurter Arzt und Kabarettist Eckart von Hirschhausen jeden Artikel auf komische Weise. Ein Beispiel: Die tägliche Routine verändert unser Hirn. Er selbst verbringe beruflich bedingt so viele Nächte in Hotels, dass er schon vor seinem eigenen Bett gestanden und sich gewundert habe, weshalb auf seinem Kopfkissen keine Schokolade liege.

Ist dieses Lesefutter eher dem Laien oder dem Kenner der Neuroforschungs- und Psycho-Szene zu empfehlen? Sicherlich können nur Letztere mit dem ironischen Beitrag über die »finite Varianz« (Kapitel 14) oder der Satire über die Psycho-Szene (Kapitel 16) etwas anfangen. Da kommt dem Erzähler aus einer Langeweile heraus die Idee zu einer neuen Körperpsychotherapie. Er entwickelt die »transkranielle Mandelkern-Massage« – und reüssiert, obwohl er weder eine besondere Indikation noch empirische Belege für die Wirksamkeit des Verfahrens vorzuweisen hat. Die Patienten rennen ihm auch so die Praxistüren ein. Als »Mandeldoktor« wird er ein reicher und bei der Presse gefragter Mann.

Mit dem Mandelgeschmack im Mund bleibt das 17-Gänge-Menü in angenehmer Erinnerung, wenig war fad und ist deshalb schnell vergessen. Und von Hirschhausens gelungener Nachtisch lässt mir das ganze Buch schmackhaft erscheinen.

Der Schluss prägt die Erinnerung. So ist das eben mit dem Gehirn.

Inka Wahl

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.

Auf seiner fiktiven Expedition in Ronald Reagans »Gedächtnisschrank« hat der Held des New Yorker Comiczeichners Garry Trudeau mit Widrigkeiten wie durch langen Nichtgebrauch verkümmerten und verkalkten Neuronen zu kämpfen.

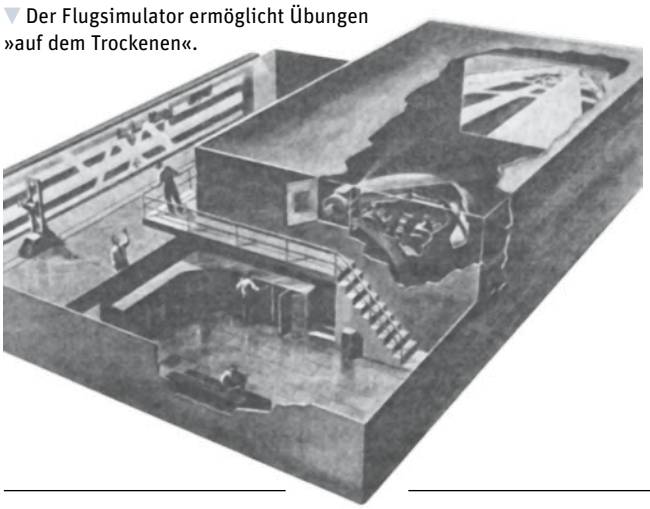
Manfred Spitz (Hg.)
Braintertainment
Expeditionen in die Welt von Geist und Gehirn
Schattauer, Stuttgart 2007.
232 Seiten, € 29,95

1957

Flugsimulator mit Fernsehschirm

»Von einer amerikanischen Flugzeugfabrik wurde eine Vorrichtung entwickelt, mit deren Hilfe die Grundausbildung der Piloten für Verkehrsflugzeuge mit Strahltriebwerken wesentlich erleichtert wird. Ein Videogerät, Telerama genannt, projiziert maßstabgerecht die Ansicht von Start- und Landebahn auf eine Leinwand. Das Videogerät ist mit der Steueranlage des Simulators gekoppelt. Von der Leinwand kann dann der Flugschüler so jede seine Reaktionen kontrollieren, die er im Übungsgerät auslöst.« *Hobby, Nr. 3, S. 59, März 1957*

▼ Der Flugsimulator ermöglicht Übungen »auf dem Trockenen«.



Bestätigung des Antiprotons

»Die Existenz dieses Teilchens war seit langem vorhergesagt worden. … Die geringen Zweifel an der Existenz des Antiprotons müssen inzwischen als behoben gelten, nachdem man nun die Vernichtung eines Antiprotons durch Schwärzungsspuren in Photo-Emulsionen nachweisen konnte. Wenn ein Proton und ein Antiproton zusammentreffen, so vernichten sie sich gegenseitig … Beim Zusammenprall entstehen zusätzlich zu zwei Gammaquanten schnelle Mesonen als Sekundärteilchen. Findet diese Vernichtung in einer Photoemulsion statt, so erscheinen die Bahn des einfallenden Teilchens und die Bahnen der Sekundärteilchen als Schwärzungsspuren, die vom Ort des Ereignisses ausgehen.« *Umschau, 57. Jg., Heft 5, S. 151, März 1957*

Auspuffgase Krebs erregend?

»Zur Prüfung dieser Frage wurden Extrakte aus den Auspuffgasen von Otto- und Dieselmotoren untersucht. Durch Aufpinselungen an Versuchstieren wurde festgestellt, daß die Extrakte aus Auspuffgasen von Dieselmotoren keine Tumoren erzeugen, wohingegen Kohlenruß und Auspuffgase von Ottomotoren in sehr hohem Maße krebserregend wirken können. Der negative Befund bei Dieselmotoren erscheint nicht eindeutig gesichert … Bedeutungsvoll ist jedoch der Befund, daß die Verbrennungsprodukte aus Ottomotoren in hohem Maße krebserregend wirken können. Hierbei ist zunächst ungeklärt, ob das Benzin oder die den Treibstoffen zugesetzten Antiklopfmittel als eigentliche Ursachen verantwortlich sind.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, 10. Jg., Heft 3, S. 110, März 1957*

Strahlender Regen und Schnee

»Die Radiumstrahlung von Regen und Schnee ist von zwei Gelehrten der Universität Bologna genauer untersucht worden. … Als sicher kann jetzt der Satz betrachtet werden, daß frischgefallener Regen oder Schnee stets strahlungsfähig ist. Die Radioaktivität des Regenwassers nimmt dann nach verhältnismäßig kurzer Zeit ab. Überraschend groß ist sie bei Gewittern, die von Hagel begleitet sind. … Zu den zuverlässigen Ergebnissen der bisherigen Forschungen gehört auch die Angabe, daß die Strahlung von Regen und Schnee immer nach etwa zwei Stunden fast völlig verschwindet.« *Helios, 13. Jg., Nr. 11, S. 344, März 1907*

Chronischer Tennis-Ellbogen

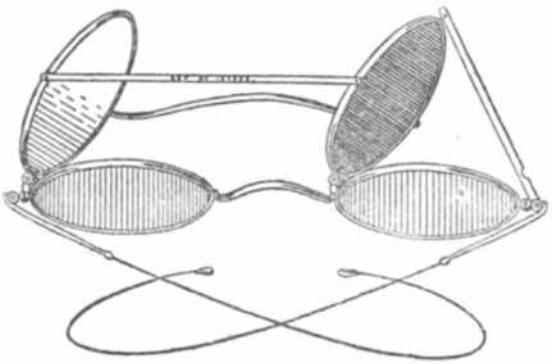
»Das Treiben des mannigfaltigsten Sports hat auch einige neue Krankheitsbilder gebracht. … Eine in dieses Gebiet gehörende Affektion ist der Tennis-Ellbogen. … Durch Beobachtung einschlägiger Fälle gelang es mir (Dr. Preiser, Hamburg), den Grund in einer chronischen Entzündung der äußeren Ellbogengelenkkapsel zu finden; die Entzündung entsteht beim Abschlagen des Balles mit abwärts gestrecktem Arm … Dabei werden zwei bestimmte Muskeln gleichzeitig gespannt, deren Fasern sich zum Teil an den Gelenkkapseln des äusseren Ellbogens ansetzen und diese nach zwei verschiedenen Richtungen zugleich zerren. Hierdurch entsteht schliesslich eine Kapselentzündung und das Tennisspiel wird immer schmerzhafter.« *Umschau, 11. Jg., Heft 10, S. 196, März 1907*

1907

Zielbrille mit links

»Die Zielbrille gestattet auch dem mit dem linken Auge Zielenden Rechtsanschlag mit dem Gewehr. Sie besteht aus einem Brillengestell, an dem vor der Gläserfassung um Scharniere bewegliche Planspiegel, mit der spiegelnden Fläche nach innen gewendet, angebracht sind; durch eine beide Spiegel verbindende Querstange werden dieselben beim Aufklappen stets parallel zueinander bewegt. … Beim Zielen mit der Brille erblickt man durch die entstehende Doppelspiegelung in dem Spiegel vor dem linken Auge das in dem Spiegel vor dem rechten Auge sich spiegelnde Bild des Visiers und des Zielobjekts und vermeidet ein Verdrehen des Visiers oder Linksanschlagen.« *Der Mechaniker, 15. Jg., Nr. 5, S. 56, März 1907*

▼ Links zielen – rechts anschlagen!



OPTIK UND KINEMATIK

Heiße Kurven aus Herzen und Nieren

Was haben das Licht, das sich in einer Kaffeetasse spiegelt, und der Zahn eines Zahnrads, das auf einem anderen abrollt, miteinander zu tun? Sie folgen denselben Kurven.

CHRISTIAN UCKE

Das Licht der tief stehenden Sonne ergibt in einer gefüllten Kaffeetasse eine halbe Nephroide.

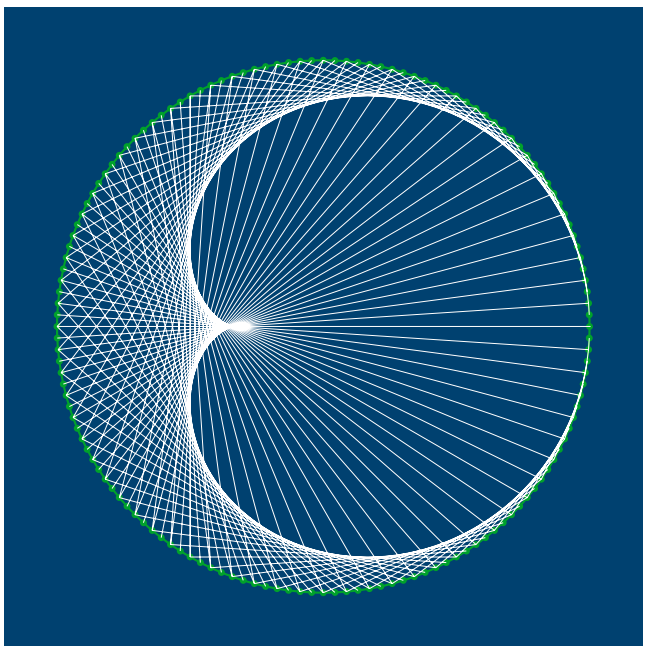
Von Norbert Treitz

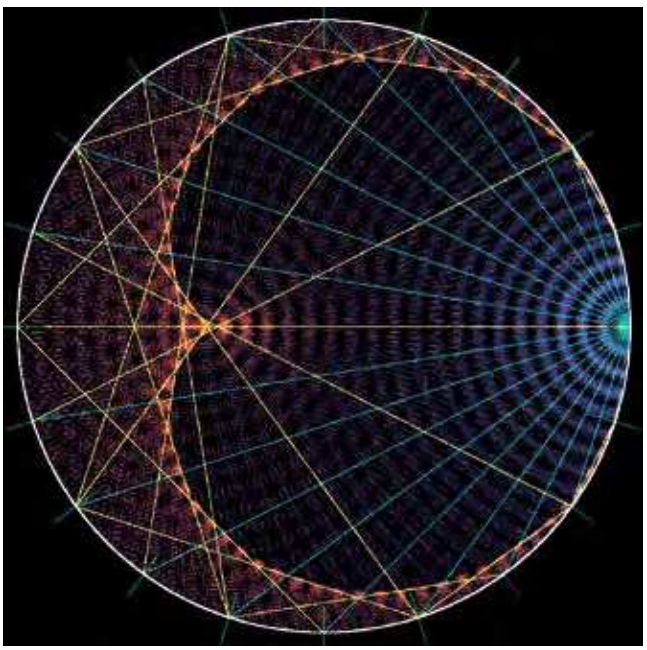
Der Brennpunkt eines Hohlspiegels oder einer Linse heißt so, weil es bei Sonnenschein dort sehr heiß werden kann – wenn auch nicht heißer als auf der Sonne selbst. Das pflegt man strahlenoptisch damit zu erklären, dass die fast parallel zueinander von der Sonne kommenden Lichtstrahlen so reflektiert oder gebrochen werden, dass sie durch diesen gemeinsamen Punkt gehen. Es erscheint plausibel, dass es dort hell und heiß wird.

Aus dem Blickwinkel der Wellenoptik gerät diese Plausibilität alsbald ins Wanken. Lichtwellen kommen fast überall von überall an oder vorbei, aber bei unordentlichen Phasenbeziehungen löschen sie sich auch meistens ganz aus. Wirklich hell und heiß (oder im Fall von Schallwellen laut) wird es nur dort, wo sie nahezu phasengleich zusammentreffen. Wir haben im Zusammenhang mit dem Antiparallelogramm (Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 114) gesehen, dass nur der Rotations-Paraboloid-Spiegel in diesem Sinne einen Brennpunkt hat. Dort kommen alle Wellenzüge mit gleichen Weglängen von der Sonne an, wenn diese (sozusagen unendlich weit entfernt) genau in der Rotationsachse steht, und zwar auf der Innenseite der Wölbung.

Bilder astronomischer Objekte außerhalb der Achse werden allesamt etwas unscharf. Ersetzt man den Parabol- durch einen Kugelspiegel, so ist diese Unschärfe nicht mehr winkelabhängig, verschwindet aber auch nirgends. Immerhin wird sie beim Schmidt-Spiegel durch die Phasenkorrekturplatte erheblich gemildert. Das gestreckte Rotations-Ellipsoid hat zwar zwei Brennpunkte im Sinne der Geometrie, aber wellen- wie strahlenoptisch ist jeder von ihnen das Bild des anderen und nicht der Sonne. Man müsste also ein riesiges Ellipsoid nehmen, in dessen einem Brennpunkt die Sonne steht und in dem anderen wir. Aus praktischen ▷

Lichtstrahlen, die von einer punktförmigen Lichtquelle am rechten Kreisrand ausgehen, erzeugen eine Kardioide (linkes Bildpaar; links ein Fadenspiel mit 144 Fäden, rechts das Wellenbild). Parallel von unten einfallendes Licht erzeugt die obere Hälfte einer Nephroide (rechtes Bildpaar).





LINKS: CHRISTOPH RÖPPE, NACH NORBERT TREITZ; RECHTS: NORBERT TREITZ

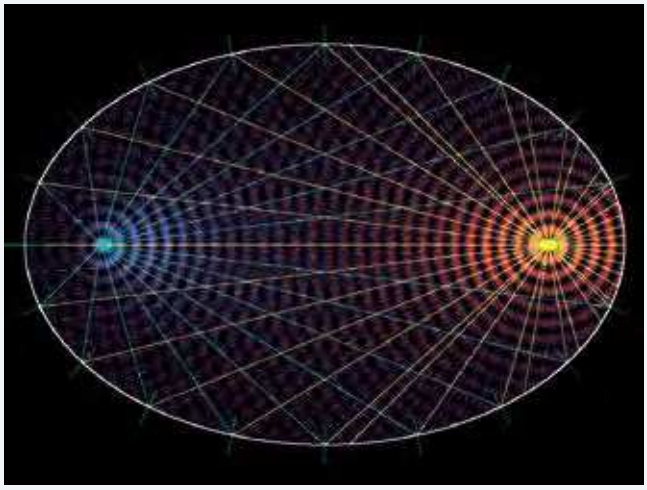
Die Kaustik im Wellenbild

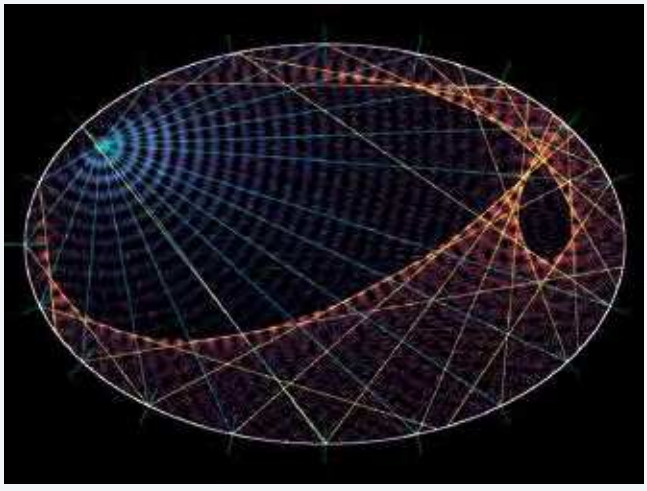
Lichtwellen gehen mit gleicher Phase vom linken Brennpunkt einer Ellipse aus, werden am Rand der Ellipse reflektiert und treffen sich mit gleicher Phase im anderen Brennpunkt wieder, denn sie haben unabhängig von dem Ort, an dem sie reflektiert werden, den gleichen Weg zurückgelegt. Das ist eine der Eigenschaften der Ellipse.

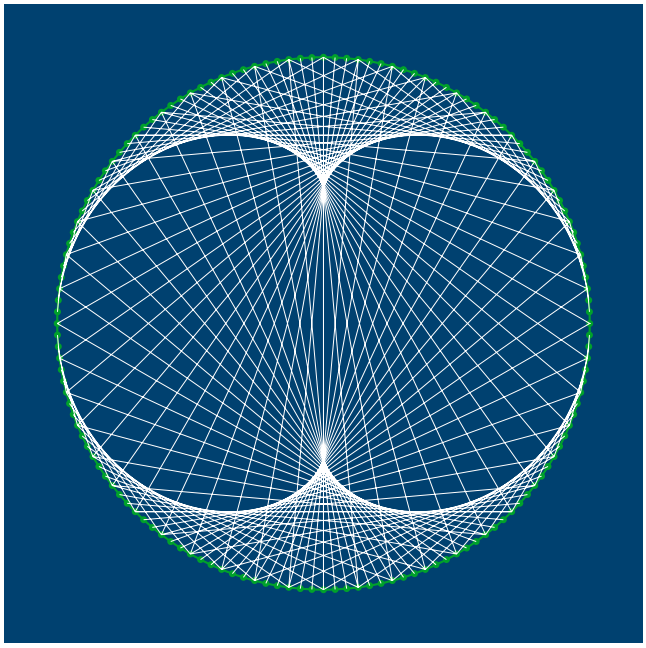
In diesen Bildern sind die Wellenberge der von der Quelle ausgehenden Welle blau dargestellt, die der reflektierten Welle rot. Diese Farben haben mit der Farbe des Lichts nichts zu tun; schließlich wechselt Licht bei der Reflexion nicht die Frequenz, und seine Wellenlänge ist – für mit bloßem Auge sichtbare Ellipsen – ohnehin viel kürzer als in diesen Zeichnungen. Der so genannte Phasensprung der Lichtwelle bei der Reflexion ist in diesen Bildern nicht berücksichtigt, da seine Auswirkungen unwesentlich sind. Für einzelne Pfade sind auch hellblaue (vor der Reflexion) und gelbe Linien (danach) eingezeichnet und mit grünen Einfallsloten versehen. Die spiegelnde Fläche selbst ist weiß.

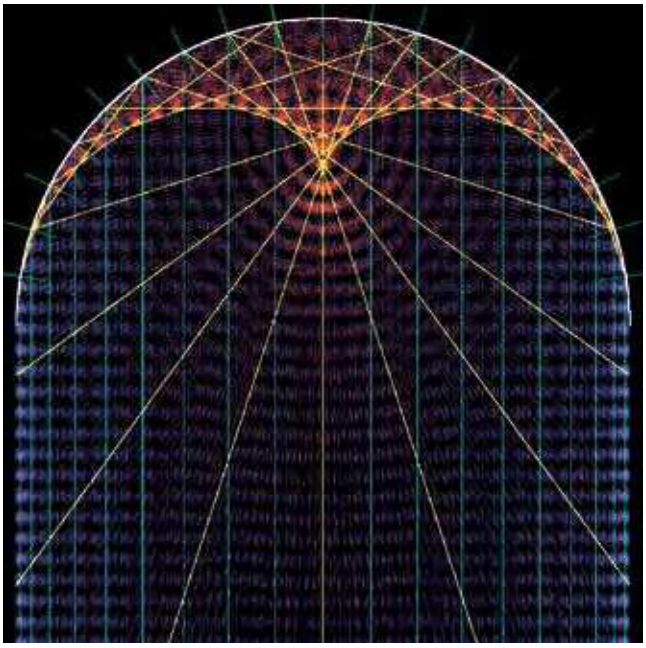
Von einem anderen Punkt, hier genau über dem linken Brennpunkt als Beispiel, liefert die Ellipse statt des Bildpunktes eine Kaustik. Sie erscheint typischerweise als Randkurve des von der reflektierten Welle überstrichenen Bereichs und als Einhüllkurve ihrer Pfade. Bemerkenswerterweise haben die Punkte der Kaustik feste Phasenbeziehungen zur Lichtquelle, die wir uns hier als kohärent vorstellen. Wie bei Bildpunkten ist eine Kaustik nicht schon deswegen hell, weil dort besonders viele Lichtstrahlen zusammenkämen, sondern weil die Wellen, die sich auch überall sonst treffen, phasengleich zueinander ankommen.

Geht man von der Ellipse zu einem (dreidimensionalen) Rotationsellipsoid über, so wird die Kaustik zu einer gekrümmten Fläche.

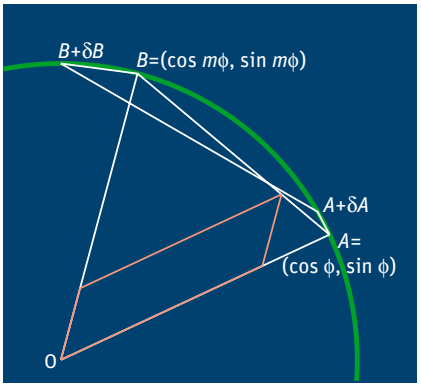








LINKS: CHRISTOPH PÖPPE, NACH NORBERT TREITZ; RECHTE REIHE: NORBERT TREITZ



So findet man die Punkte der Kaustik. In diesem Beispiel ist $m = 3$.

▷ Gründen begnügt man sich mit einem kleinen Kopfstück am irdischen Ende – und ist wieder beim Parabolspiegel.

Was geschieht nun, wenn wir Licht von einem Punkt oder aus einer »nahezu unendlich weit entfernten« Quelle, die nicht so schön in der optischen Achse liegt, auf einen gekrümmten Spiegel schicken? Statt sich in einem Punkt zu konzentrieren (der immer noch die Größe der Wellenlänge nicht unterschreiten kann), findet es sich in einem ausgedehnten Bereich, der eine mehr oder weniger scharf ausgeprägte Grenzfläche hat. Bei Beschränkung auf zwei Dimensionen wird aus dieser eine Kurve, auf der es immer noch einigermaßen heiß oder zumindest hell werden kann und die daher Kaustik (von griechisch *kaustikos* »brennend«) heißt. Zu jedem Spiegelprofil und jedem Ort einer punktförmigen Lichtquelle – beziehungsweise jeder Richtung einer ankommenden ebenen Welle – gibt es eine solche Kaustik (Kasten S. 107).

Wir befassen uns zunächst mit dem sehr einfachen kreisförmig gebogenen Spiegel, dem in drei Dimensionen ein Kugel- oder Zylinderspiegel entspricht, und mit Lichtquellen im Unendlichen sowie auf dem Rand des Kreises. Dazu stellen wir eine fast volle Tasse mit Milch oder Milchkaffee bei tief stehender Sonne ins Sonnenlicht oder beleuchten ihre Innenseite mit einer kleinen Taschenlampe von ihrem Rand aus. Im zweiten Fall gibt es eine so genannte Kardioide (»Herzkurve«), im ersten Fall eine halbe Nephroide (»Nierenkurve«, Bild S. 106 oben). Wenn wir die ganze Nephroide sehen wollen, brauchen wir entweder eine zweite Sonne auf der entgegengesetzten Seite oder – mit etwas weniger Aufwand – einen richtig platzierten Taschenspiegel. Immerhin sieht die halbe Nephroide der interessanten Hälfte der Kardioide qualitativ so ähnlich, dass beide im Zusammenhang mit Tassen oder (innen zylindrischen) Eheringen oft miteinander verwechselt werden.

Cremonas Fadenspiele

Sowohl Kardioide als auch Nephroide sind Epizykloiden, das heißt Kurven, die ein Punkt auf dem Rand eines Kreises beschreibt, der wiederum auf einem anderen Kreis abrollt. Wie kommen diese beiden sehr verschiedenen physikalischen Vorgänge dazu, dieselben Kurven zu erzeugen? Luigi Cremona (1830 – 1903), den die Ingenieure von der grafischen Behandlung von Kräftebilanzen in der Statik kennen, hat zwischen der Optik und der Kinematik eine Brücke geometrischer Art gebaut: Fadenornamente.

Dazu setzen wir n Nägel als Ecken eines regulären n-Ecks auf ein Brett und nummerieren sie in Gedanken von 0 bis $n-1$. Dann wählen wir eine ganze Zahl m und spannen einen Faden von Ecke 1 zu Ecke m, von Ecke 2 zu Ecke $2m$ und allgemein von Ecke i zu Ecke $i \cdot m$, wobei wir über Ecke $n-1$ hinaus einfach im Kreis weiterzählen: Ecke n ist Ecke 0, Ecke $n+1$ ist Ecke 1, und allgemein nehmen wir nicht $i \cdot m$, sondern $(i \cdot m)$ modulo n, den Rest dieser Zahl beim Teilen durch n. Anstelle von Hammer, Nagel und Faden kann man auch Zirkel und Lineal oder ein Computerprogramm verwenden (Bilder S. 106/107 unten).

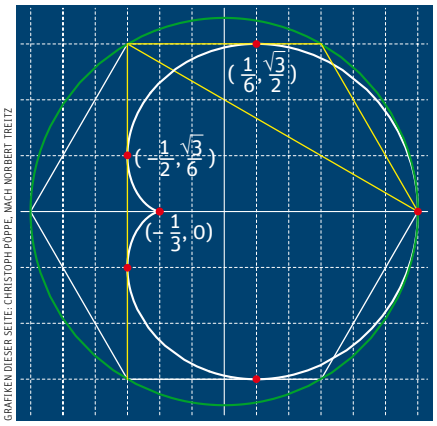
Stellen wir uns eine punktförmige Lichtquelle in Ecke 0 vor (ganz rechts auf dem Kreisrand). Ein Lichtstrahl, der von dort nach Ecke i geht, wird von dem innen verspiegelten Kreisumfang nach Ecke $2i$ reflektiert. Für $m = 2$ zeigt uns das Fadenbild also den Strahlengang für eine punktförmige Lichtquelle am Kreisrand.

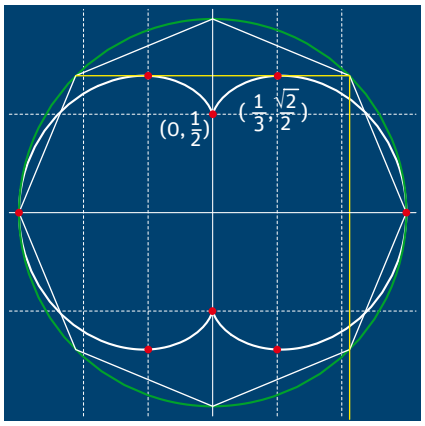
Parallele Lichtstrahlen, die genau von unten einfallen, gehen – zum Beispiel – durch Ecke $n-i$ (die wir auch $-i$ nennen können, da wir ohnehin nur modulo n rechnen) und Ecke i. Dort wird ein solcher Lichtstrahl nach Ecke $3i$ reflektiert. Ein Fadenbild für $m = 3$ zeigt uns also den Weg des Sonnenlichts in der Kaffeetasse. Beide Bilder werden umso realistischer, je größer n ist. Man sieht dann deutlich eine Einhüllkurve dieser Kreissehnen. Mathematisch ergibt sie sich, wenn man »n gegen unendlich gehen lässt«.

Nichts hindert uns, über die physikalisch sinnvollen Fälle $m = 2$ und $m = 3$ hinaus größere Werte für m zu wählen. Es ergibt sich in jedem Fall eine Figur mit $(m-1)$-facher Drehsymmetrie.

Wie bestimmt man diese so deutlich sichtbare Einhüllkurve? Wir legen den Nullpunkt unseres Koordinatensystems in den Kreismittelpunkt, setzen den Radius des Kreises gleich 1 und messen Winkel wie üblich gegen die positive x-Achse. Es gibt ein Kontinuum von Kreissehnen; sie laufen vom Umfangspunkt A mit dem Winkel ϕ zum Umfangspunkt B mit dem Winkel $m\phi$. Jeder Punkt der Einhüllkurve ist auch Punkt einer dieser Sehnen, und die Sehne ist Tangente an die Einhüllkurve in diesem Punkt; aber welcher Punkt ist es?

Es ist der Schnittpunkt der Sehne mit der »infinitesimal benachbarten« Sehne. Das heißt, man bestimmt den Schnittpunkt mit einer benachbarten Sehne und





GRAFIKEN DIESER SEITE: CHRISTOPH PÖPPE, NACH NORBERT TREITZ

Ein regelmäßiges Sechseck hilft spezielle Punkte der Kardioide zu finden (links): Durch seine Ecken verlaufen spezielle Lichtstrahlen (gelb), die vertikale und horizontale Tangenten liefern. Ähnlich nützlich für eine Freihandzeichnung ist das regelmäßige Achteck bei der Nephroide (rechts).

lässt die beiden Sehnen gegeneinanderstreben; dabei strebt deren Schnittpunkt gegen den gesuchten Punkt. Die Sehne von A nach B und ihre Nachbarin von $A+\delta A$ nach $B+\delta B$ bilden zusammen mit den kurzen Verbindungsstücken ein überschlagenes Viereck, das am Schnittpunkt in zwei nahezu ähnliche Dreiecke zerfällt. Deren Größen verhalten sich wie $m:1$; also teilt der Schnittpunkt auch die Sehne im Verhältnis $m:1$ (Bild links oben).

Anders ausgedrückt: Der gesuchte Schnittpunkt ist $m/(m+1)$ mal der Vektor A plus $1/(m+1)$ mal der Vektor B (siehe das rote Vektorparallelogramm im Bild links oben). Punkt A rotiert auf dem Kreisumfang; das tut Punkt B auch, allerdings mit der m-fachen Geschwindigkeit.

Wir haben also eine Art Uhr vor uns. Allerdings ist die Ausgangsstellung (»12 Uhr«) nicht oben, sondern rechts, die Zeiger wandern gegen den Uhrzeigersinn, und der kleinere Zeiger ist der schnellere. Beide Zeiger spannen ein Parallelogramm auf, und unsere Kurve ist der Weg der Ecke des Parallelogramms, die dem Nullpunkt gegenüberliegt.

Alternativ können wir uns auch den kleinen Zeiger an der Spitze des großen angebracht denken; dann beschreibt die Spitze des kleinen Zeigers die Hüllkurve. Und ganz genauso würde sich ein Zahnrad mit dem Radius $1/(m+1)$ bewegen, das auf einem feststehenden Zahnrad mit dem Radius $(m-1)/(m+1)$ abrollt.

Weitere Kaustiken und viele andere Abrollkurven werden wir im nächsten Monat kennen lernen. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Kaustik in der Kaffeetasse. Von Christian Ucke und Christoph Engelhardt in: Physik in unserer Zeit, Bd. 29, Nr. 3, S. 120, 1998. Online unter http://users.physik.tu-muenchen.de/cucke/ftp/lectures/kaustik3.pdf

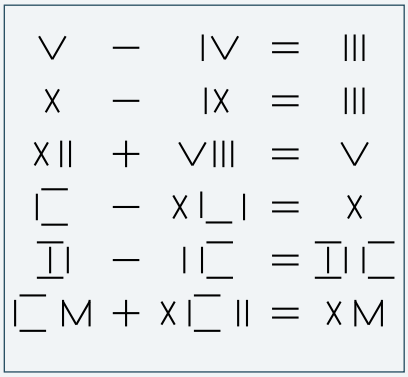
Weblinks zu diesem Thema und Kurzfilme zu Cremonas Fadenspielen finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864302.

AUTOR UND LITERATURHINWEIS

PREISRÄTSEL

Hölzchen-Arithmetik

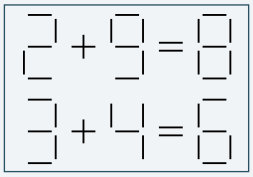
Von Roland Mildner

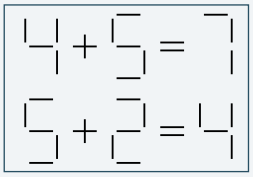


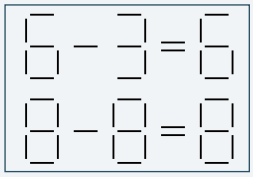
Wir haben aus Streichhölzern zwölf Gleichungen gelegt, sechs in römischen und sechs in arabischen Ziffern.

Diese Gleichungen sind offenbar alle falsch. Legt man aber in jeder Gleichung nur ein Hölzchen um, so werden die Gleichungen alle wahr.

Wie lauten die zwölf richtiggestellten Gleichungen?







Schicken Sie Ihre Lösung in einem Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei T-Shirts »Leonardo da Vinci«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 13. 03. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie ab sofort auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

Lösung zu »Der Navigator« (Januar 2007)

Die Insel heisst Stewart Island und liegt südlich von Neuseeland. Die Linie, auf der alle von Zagreb und Tunis gleichweit entfernten Orte liegen, also die Mittelsenkrechte m der Verbindungslinie Zagreb–Tunis, trifft vom Atlantik kommend etwas nördlich von Bordeaux auf den Kontinent, durchquert Südfrankreich, den Norden Korsikas und danach noch das inselreiche südgriechische Meer etwa mit Kurs auf den Sinai. Aber an dem Punkt von m, der nordöstlich von Madrid liegt, existiert keine Insel, denn er ist etwa 165 Kilometer weit vom Meer entfernt mitten in Südfrankreich. Damit scheiden alle europäischen Inseln als Lösung aus.

Hier kommt nun ins Spiel, dass m keine Gerade, sondern ein Großkreis ist und ein zweiter Punkt P auf m existiert, von dem aus gesehen Madrid südwestlich liegt. Um diesen zu finden, betrachten wir die Umgebung des Punktes M^*, der genau antipodal zu M = Madrid liegt: Von P aus gesehen liegt Madrid im Südwesten, also M^* im Nordosten. Der Großkreis durch P, M und M^* verläuft von P aus gesehen von Südwest nach Nordost, von seinem Antipodenpunkt P^* aus aber von Südost nach Nordwest! Also liegt Madrid nicht etwa südwestlich von dem Punkt P^*, der ebenfalls auf m liegen muss, sondern südöstlich.

In der Europakarte findet man den Punkt P^* auf m bei etwa 11,8° westlicher Länge und 47,0° nördlicher Breite. Der gesuchte Punkt P liegt also bei 168,2° östlicher Länge und 47,0° südlicher Breite. Auf einer Karte von Neuseeland findet man an dieser Stelle eine kleine, in zwei Tagen umsegelbare Insel: Stewart Island.

Der Ankerplatz des Schiffes liegt entweder in der Half Moon Bay (allerdings hat man von dort aus in Richtung Südwest keinen freien Blick über das Meer) oder an der Südwestspitze der Insel.

Die Gewinner der drei Victorinox-Etuis sind Wolfgang Seidel, Bruckmühl; Jörg Straube, Baunatal; und Thomas Kochmann, Bochum.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

lässt die beiden Sehnen gegeneinanderstreben; dabei strebt deren Schnittpunkt gegen den gesuchten Punkt. Die Sehne von A nach B und ihre Nachbarin von $A+\delta A$ nach $B+\delta B$ bilden zusammen mit den kurzen Verbindungsstücken ein überschlagenes Viereck, das am Schnittpunkt in zwei nahezu ähnliche Dreiecke zerfällt. Deren Größen verhalten sich wie $m:1$; also teilt der Schnittpunkt auch die Sehne im Verhältnis $m:1$ (Bild links oben).

Anders ausgedrückt: Der gesuchte Schnittpunkt ist $m/(m+1)$ mal der Vektor A plus $1/(m+1)$ mal der Vektor B (siehe das rote Vektorparallelogramm im Bild links oben). Punkt A rotiert auf dem Kreisumfang; das tut Punkt B auch, allerdings mit der m-fachen Geschwindigkeit.

Wir haben also eine Art Uhr vor uns. Allerdings ist die Ausgangsstellung (»12 Uhr«) nicht oben, sondern rechts, die Zeiger wandern gegen den Uhrzeigersinn, und der kleinere Zeiger ist der schnellere. Beide Zeiger spannen ein Parallelogramm auf, und unsere Kurve ist der Weg der Ecke des Parallelogramms, die dem Nullpunkt gegenüberliegt.

Alternativ können wir uns auch den kleinen Zeiger an der Spitze des großen angebracht denken; dann beschreibt die Spitze des kleinen Zeigers die Hüllkurve. Und ganz genauso würde sich ein Zahnrad mit dem Radius $1/(m+1)$ bewegen, das auf einem feststehenden Zahnrad mit dem Radius $(m-1)/(m+1)$ abrollt.

Weitere Kaustiken und viele andere Abrollkurven werden wir im nächsten Monat kennen lernen. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Kaustik in der Kaffeetasse. Von Christian Ucke und Christoph Engelhardt in: Physik in unserer Zeit, Bd. 29, Nr. 3, S. 120, 1998. Online unter http://users.physik.tu-muenchen.de/cucke/ftp/lectures/kaustik3.pdf

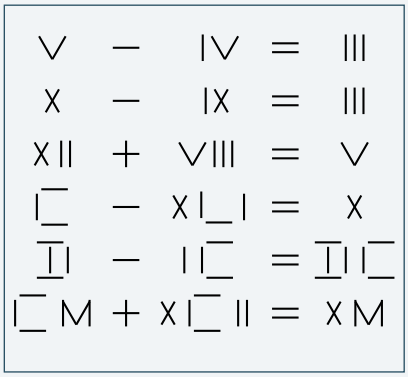
Weblinks zu diesem Thema und Kurzfilme zu Cremonas Fadenspielen finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/864302.

AUTOR UND LITERATURHINWEIS

PREISRÄTSEL

Hölzchen-Arithmetik

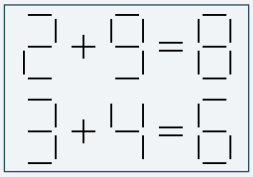
Von Roland Mildner

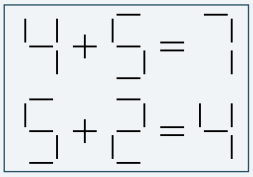


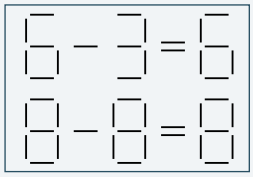
Wir haben aus Streichhölzern zwölf Gleichungen gelegt, sechs in römischen und sechs in arabischen Ziffern.

Diese Gleichungen sind offenbar alle falsch. Legt man aber in jeder Gleichung nur ein Hölzchen um, so werden die Gleichungen alle wahr.

Wie lauten die zwölf richtiggestellten Gleichungen?







Schicken Sie Ihre Lösung in einem Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei T-Shirts »Leonardo da Vinci«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 13. 03. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie ab sofort auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

Lösung zu »Der Navigator« (Januar 2007)

Die Insel heisst Stewart Island und liegt südlich von Neuseeland. Die Linie, auf der alle von Zagreb und Tunis gleichweit entfernten Orte liegen, also die Mittelsenkrechte m der Verbindungslinie Zagreb–Tunis, trifft vom Atlantik kommend etwas nördlich von Bordeaux auf den Kontinent, durchquert Südfrankreich, den Norden Korsikas und danach noch das inselreiche südgriechische Meer etwa mit Kurs auf den Sinai. Aber an dem Punkt von m, der nordöstlich von Madrid liegt, existiert keine Insel, denn er ist etwa 165 Kilometer weit vom Meer entfernt mitten in Südfrankreich. Damit scheiden alle europäischen Inseln als Lösung aus.

Hier kommt nun ins Spiel, dass m keine Gerade, sondern ein Großkreis ist und ein zweiter Punkt P auf m existiert, von dem aus gesehen Madrid südwestlich liegt. Um diesen zu finden, betrachten wir die Umgebung des Punktes M^*, der genau antipodal zu M = Madrid liegt: Von P aus gesehen liegt Madrid im Südwesten, also M^* im Nordosten. Der Großkreis durch P, M und M^* verläuft von P aus gesehen von Südwest nach Nordost, von seinem Antipodenpunkt P^* aus aber von Südost nach Nordwest! Also liegt Madrid nicht etwa südwestlich von dem Punkt P^*, der ebenfalls auf m liegen muss, sondern südöstlich.

In der Europakarte findet man den Punkt P^* auf m bei etwa 11,8° westlicher Länge und 47,0° nördlicher Breite. Der gesuchte Punkt P liegt also bei 168,2° östlicher Länge und 47,0° südlicher Breite. Auf einer Karte von Neuseeland findet man an dieser Stelle eine kleine, in zwei Tagen umsegelbare Insel: Stewart Island.

Der Ankerplatz des Schiffes liegt entweder in der Half Moon Bay (allerdings hat man von dort aus in Richtung Südwest keinen freien Blick über das Meer) oder an der Südwestspitze der Insel.

Die Gewinner der drei Victorinox-Etuis sind Wolfgang Seidel, Bruckmühl; Jörg Straube, Baunatal; und Thomas Kochmann, Bochum.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der Wyatt-Earp-Effekt

oder Die betörende Macht kleiner Wahrscheinlichkeiten

Von F. Thomas Bruss

In den 1990er Jahren sah ich mit meiner Frau in Los Angeles den Film »Wyatt Earp«. Wohl jeder kennt den Namen dieses Revolverhelden aus dem Wilden Westen, der zahlreiche Duelle für sich entschied, unglaubliche Schießereien zwischen Banden überlebte und dann … einfach sehr alt wurde.

Als am Ende des Films (dokumentarisch) betont wurde, dass er bei all diesen großen Risiken nie auch nur einen Kratzer abbekommen hatte, da erwischte es mich und ich flüsterte: »Unglaublich!« Doch dann musste ich gleich über mich selbst lachen. Dummer Trugschluss! Und das passiert *mir*, der Studenten immer wieder vorführt, warum man bei der Interpretation von Wahrscheinlichkeiten eben sehr aufpassen muss. Im Klartext: Wir kennen den Namen Wyatt Earp hauptsächlich deswegen, weil er alle diese Gefährdungen überlebte. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist sehr klein. Deshalb gibt es nicht viele Wyatt Earps. Und wiederum deshalb dreht man Filme über ihn. Meine Reaktion von damals habe ich nicht vergessen, weil mich immer wieder vieles daran erinnert. Unsere Welt ist voller Wyatt Earps, die wir direkt oder indirekt bestaunen oder bewundern, aber oft nicht erkennen.

»Extreme, das ist ihr Wesenszug, sind immer sehr unwahrscheinlich«

Mangelnde Intuition, sehr unwahrscheinliche Ereignisse oder Phänomene gedanklich richtig einzuordnen, ist sehr typisch für uns. Nennen wir den Faktor, der dies auslöst, »Wyatt-Earp-Effekt«. Was ich zeigen möchte, ist, dass dieser Effekt in verschiedenen Formen auftritt. Einige sind harmlos oder gar amüsant, andere regen uns zum Nachdenken an, wiederum andere können sogar sehr gefährlich werden.

Frau X, Chefin der Investment-Abteilung einer Bank, hat Wichtigeres zu tun, als über Wyatt Earp nachzudenken. Sie starrt auf den Brief in ihrer Hand und liest die Schlussfolgerung: »Der Dax wird zum Jahresende deutlich höher stehen.« Was für eine gewagte Prophezeiung! Nicht, dass die erfahrene Finanzmanagerin leicht zu beeindrucken wäre, schließlich wimmelt es in ihrer Branche von falschen Propheten. Aber diese Analyse, nur eine Seite lang, stammt von Herrn Y. Der ließ Frau X schon vor drei Jahren diskret wissen, dass seine Vorhersagen immer zutrafen. Das hat sie überprüfen lassen; und tatsächlich: Alle Vorhersagen von Herrn Y waren bisher eingetreten, Jahr für Jahr, wirklich alle, genau sieben an der Zahl. Voriges Jahr hatte sie noch gezögert; jetzt jedoch greift sie zum Hörer. Und Herr Y hat eine neue Kundin.

Vielleicht wird Frau X nun sehr gut beraten werden, vielleicht aber auch nicht. Denn Herr Y könnte zwar ein Wyatt Earp sein, genauso gut aber auch ein Betrüger. Im schlimmsten Fall verfolgt Herr Y eine simple Betrugsstrategie, und die geht so: Herr Y schreibt an 512 Banken (in mehreren Ländern) und teilt der einen Hälfte mit, dass der Dax (oder der CAC40, der FTSE et cetera) steigen wird. Die andere Hälfte der Banken lässt er wissen, dass der Dax fallen wird. Resultat: In etwa der Hälfte der Fälle wird Herr Y Recht behalten (und wenn er in jedem Land eine gerade Anzahl von Banken anschreibt, dann sogar in genau 256 Fällen).

Im nächsten Jahr schreibt Herr Y nur denen, bei denen seine Voraussage eintraf, im nächsten Jahr wiederum und so weiter. Diese Strategie erfordert eine gewisse Beharrlichkeit und insgesamt erwartungsgemäß etwa 512 + 256 + 128 + … + 4 + 2 + 1 = 1023-mal Briefporto (keine E-Mails!). Ingesamt kostet Herrn

Y die Aktion keine 1000 Euro. Auch mag sein Betrugsversuch in einigen Fällen sogar zufällig auffliegen. Ohne Zweifel würde er jedoch mit einigen der ausgewählten Banken ins Geschäft kommen.

Hierbei ist es für Frau X eigentlich unerheblich, ob Herr Y nun ein Betrüger ist oder, wahrscheinlicher, seine Vorhersagen das Zufallsprodukt einer Glückssträhne, welche ihre Aufmerksamkeit auf ihn lenkt. Es gibt so ja viele Berater und Analysten! Bevor sie jedoch auf ihn setzt, sollte Frau X sicherstellen, ob sie bei Herrn Y beide Möglichkeiten – Zufall oder Glück – weit gehend ausschließen kann. Sie sollte zuerst überprüfen, ob er ihrer Meinung nach eben wirklich etwas Besonderes zu bieten hat.

Worauf ich hinauswill, nimmt Form an. Wir alle sind Zufallsprodukt unserer Gene und unserer Umwelt. Deshalb unterliegen wir in dem, was wir sind und was wir tun, der natürlichen Tendenz hin zum Durchschnitt. Dies ist nicht nur eine Erfahrungstatsache, sondern auch theoretisch fundiert: Der so genannte Zentrale Grenzwertsatz beweist, dass Summen vieler unabhängiger Einflüsse annähernd »normalverteilt« sind. Umso mehr beeindrucken uns daher Extreme.

Der natürliche Trend zum Durchschnitt

Extremwerte treten, das ist ihr Wesenszug, immer mit sehr kleinen Wahrscheinlichkeiten auf. Bei einer hinreichend großen Anzahl von »Experimenten« werden jedoch auch sie Wirklichkeit. Deshalb gibt es eben 2,20 Meter große Basketballtalente, atemberaubend schöne Frauen und hyperintelligente Studenten, die alle zur Bewunderung anstehen. – Man wird sie ihnen entgegenbringen.

Oft sind wir gegen diesen Effekt immun. Wer, zum Beispiel, wäre wirklich erstaunt, eine toll aussehende Frau zu sehen, wenn … wenn er sie auf der Leinwand sieht? Jeder weiß eben, dass Filmschauspielerinnen auch nach ihrem Aussehen ausgewählt werden. Das Selektionsprinzip, das alles erklärt, ist hier offensichtlich, und von einem Effekt zu sprechen wäre lächerlich. Anders sieht die Lage aus, wenn das Selektionsprinzip in mehreren Varianten gleichzeitig zum Zug kommt.

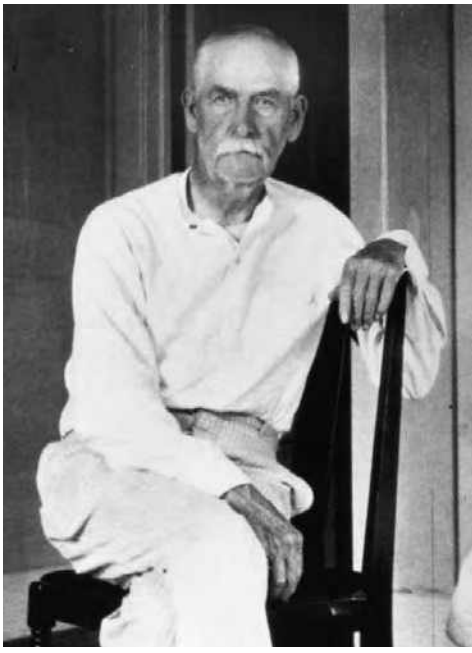
An einem Tag der offenen Tür der Universität Namur (Belgien) hatte die Fachschaft Mathematik die ersten 5000 Stellen der Zahl Pi = 3,1415… in großen Ziffern ausgedruckt und zu einer Papierschlange zusammengeklebt, die durch das ganze Institut führte. Dabei entdeckte ein Student die Teilfolge …999999… – sechsmal die gleiche Ziffer! »Das kann doch kein Zufall sein, oder?!«, fragte er. Nehmen wir einmal an, alle Stellen der Ziffernfolge der Zahl Pi seien wirklich unabhängig voneinander und mit gleicher Wahrscheinlichkeit eine der Ziffern 0,1,2, …, 9. Dann hätte eine 999999 an einer festen Stelle der Dezimaldarstellung von Pi die Wahrscheinlichkeit von einem Millionstel, also einen sehr kleinen Wert.

Irgendwo unter den ersten 5000 Stellen von Pi befindet sich jedoch eine 999999, wie man (durch Rekursion) ausrechnen kann, mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 0,35 Prozent, also einem schon erheblich höheren Wert. Eine beliebige andere Ziffer sechsmal hintereinander hätte aber dieselbe Verwunderung ausgelöst! Wenn wir nun noch an andere auffallende Folgen denken, wie beispielsweise 123456 oder 001122 oder Folgen anderer Länge, dann wird das Auffinden eines »außerordentlichen« Ereignisses leicht erklärbar.

Unser erster Schluss: Mathematik ist besser als nur Intuition. Intuition unterschätzt oft die tatsächliche Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses. Unser Beispiel zeigt aber noch mehr. Glauben Sie, es würde Ihnen auffallen, wenn (hypothetisch) in keinem Sechserblock der 5000 ersten Stellen von Pi die Ziffer 9 mehr als höchstens zweimal vorkäme? Ich glaube kaum. Und dennoch hat dieses Ereignis eine viel kleinere Wahrscheinlichkeit als das Auftreten einer …999999…. im gleichen Abschnitt. Folglich hängt die Auffälligkeit nicht nur von der Unwahrscheinlichkeit ab, sondern auch von anderen Faktoren. Bei der …999999… spielt, genau wie beim Revolverheldentum eines Wyatt Earp, wohl unsere Erziehung eine wichtige Rolle.

Wie sieht es nun mit nichts sagenden Folgen aus, wie etwa …841971…? Nichts sagend? Vorsicht! Für Sie und mich vielleicht. Aber für alle, die am 8. April 1971 geboren sind, ist dies eine vertraute und damit sehr auffällige Ziffernfolge, wie sie übrigens auch Pi schon auf Platz 42 bietet. Man könnte sagen, Selektion ist manchmal selbst »vorselektionsabhängig«. Hier ist die Vorselektion noch (prozentual) klein, auch wenn sie alleine ▷

OBEN: DEFD-MOVIES, UNTEN: CORBIS



Filmstar und Wirklichkeit: Wyatt Earp – oben dargestellt von Kevin Costner in dem gleichnamigen Film, unten der 78-Jährige selbst. Er überstand sein duellreiches Berufsleben gegen jede Wahrscheinlichkeit und wurde knapp 81 Jahre alt.

▷ schon in Deutschland tausende Menschen hellhörig werden ließe.

Ein Wort zu den »Unglaublich«-Ereignissen, wie sie jeder von uns kennt und von denen am Stammtisch Herr Hinz ein typisches zum Besten gibt: »Komme ich doch in Rio gegen Mitternacht aus dieser kleinen Strandbar, und wer, glauben Sie, steht vor mir? Frau Kunz aus dem 2. Stock. Wir hatten keine Ahnung! Ist das nicht unglaublich?« Zwar freuen wir uns mit Herrn Hinz über diesen Zufall, lernen aber auch mitzudenken. Es handelt sich dabei um einen dieser unzählbar denkbaren, unglaublichen Zufälle. Frau Kunz hat, von Millionen von Brasilianern unerkannt, ihren Urlaub genießen können, dann aber dennoch eine Zufallsselektion ausgelöst. Vielleicht hätte sie sich sogar noch mehr gefreut, unerwartet ihren Jugendfreund Herrn Meier in São Paulo zu treffen. Dazu kam es leider nicht. Zu kleine Wahrscheinlichkeiten fordern in der Regel ganz unverschämt ihr Recht – sie sind Raritäten. Und dennoch: Von Zeit zu Zeit kommt ein Wyatt Earp trotzdem mal durch.

»Bedingte Wahrscheinlichkeiten werden als absolute Wahrscheinlichkeiten fehlinterpretiert«

Selektion tritt als Effekt sehr subtil auf. Zudem wird dies manchmal leider auch gefährlich, insbesondere, wenn die Selektion aus gegenseitig auf sich aufbauenden Vorselektionen hervorgeht. Ich bezeichne diese als »interagierende Selektion«. Interagierende Selektion kann vieles erklären, sowohl in der Geschichte der Menschheit als auch schon in der Evolutionstheorie. Wir bleiben hier bei einfacheren (traurigen) Beispielen aus der jüngeren Geschichte.

Geringe Wahrscheinlichkeiten können im Zusammenspiel von Personen in ihrem geschichtlichen Umfeld eine Zufallsselektion auslösen, die als hochgradige Qualifikation, ja gar als Berufung angesehen wird. Dies kann zu fanatischer Bewunderung führen – mit schrecklichen Folgen. Dem bekannten General, der sich zu Beginn des 19. Jahrhunderts zum Kaiser der Franzosen krönte und dann Frankreich und Europa ins Verderben führte, zollen viele Franzosen wegen seines bleibenden Einflusses auch heute noch Bewunderung. Fest steht aber, dass er ohne seine militärischen Anfangserfolge kaum Gelegenheit gehabt hätte, seine Persönlichkeit auf Massen wirken zu lassen und Millionen in den Tod zu führen. Hätte man ihm »Feurigkeit« oder Charisma auch ohne seine Anfangserfolge bestätigt? Und über die Auswirkungen bestimmter »Anfangserfolge« in der deutschen Geschichte zwischen 1935 und 1940 möchte auch ein Mathematiker gar nicht erst nachdenken.

Historisch stellen wir in diesen Beispielen nichts Neues fest, aber Vergleiche zu unseren einfachen Zahlenfolgen werfen ein neues Licht darauf. Diese Anfangserfolge – wie auch immer sie ohne das Vorfeld der Französischen Revolution oder der Weimarer Verträge und schlimmer Arbeitslosigkeit verlaufen wären – hätten nicht annähernd dieselbe Wirkung haben können, weil die Vorselektion relativ klein geblieben wäre. Mit dem jeweiligen geschichtlichen Vorfeld waren aber plötzlich Millionen auf gewisse »Ziffernfolgen« eingestimmt, die sie als die ihrigen erkannten.

Harmlos, amüsant oder gefährlich – der Wyatt-Earp-Effekt lauert in allen Ecken. Er beruht auf einer typischen Fehlinterpretation bedingter Wahrscheinlichkeiten (nachdem ein Ereignis schon unsere ganz besondere Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat) als absolute Wahrscheinlichkeiten. Aber er kann sehr subtil wirken und uns dann schnell zu falschen intuitiven Erwartungshaltungen oder Schlussfolgerungen verleiten. Deshalb sollten wir gewarnt sein, ihn sofort erkennen und nicht darauf hereinfallen. Ein Name kann für einen solchen Zweck oft hilfreich sein. Und getauft haben wir ihn zumindest.

Zum Schluss ein Test. Vor etwa drei Jahren las ich eine Studie, die zu folgendem Ergebnis kam: »Erfahrung zahlt sich aus! Dies gilt auch bei Investment-Beratern! Je länger sie ihren Beruf ausübten, umso erfolgreicher waren sie im Durchschnitt.« Die in dieser Studie aufgeführten statistischen Daten belegten dies übrigens in der Tat ganz eindeutig.

Sind Sie davon beeindruckt? Offenbar nicht, denn ich sehe, lieber Leser, dass Sie über diesen Unfug soeben herzlich lachen! Sie hätten hierzu diesen Artikel wohl gar nicht gebraucht. Umso besser. Wenn Sie jetzt mit Ihrem Lachen so schnell waren wie Wyatt Earp mit seinem Colt, dann freue ich mich jedoch sehr. ◁

F. Thomas Bruss ist Professor für Mathematik und Präsident des Mathematischen Departements der Freien Universität Brüssel (Université Libre de Bruxelles).

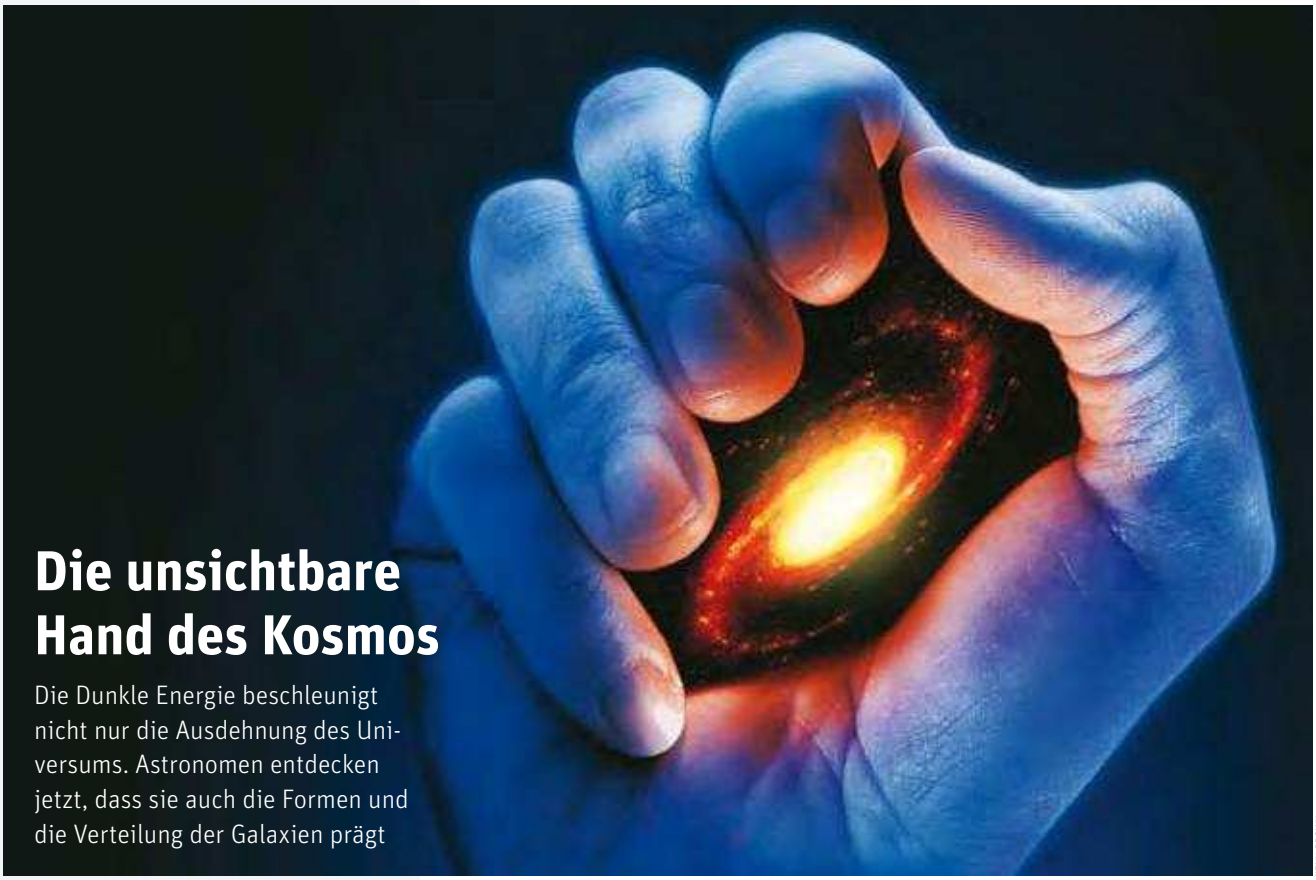
AUTOR

Lebendige Worte.

Erleben Sie Abenteuer voller Action. Geschichten voller Spannung. Und Werke voller Wissen. Mit Hörbüchern von audible.de tauchen Sie in faszinierende Welten ein. Egal wo Sie gerade sind. Einfach herunterladen und loshören.

www.spektrum.de/audible

audible.de
Hörbücher und Audiomagazine zum Download



Die unsichtbare Hand des Kosmos

Die Dunkle Energie beschleunigt nicht nur die Ausdehnung des Universums. Astronomen entdecken jetzt, dass sie auch die Formen und die Verteilung der Galaxien prägt

KENN BROWN

WEITERE THEMEN IM APRIL

FOTO: CARY WOLINSKY; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

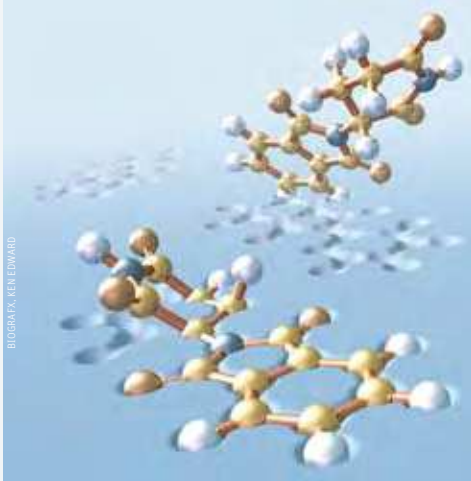
Dem Autismus auf der Spur

Eine neue Theorie erklärt dieses Leiden, das mit fast totaler Selbst-Abkapselung einhergeht, mit einem Defekt der kürzlich entdeckten Spiegelneuronen

IBM CORP.

Intelligenter Rechenschieber

Vor der Ära der Taschenrechner war der Rechenschieber bei Wissenschaftlern und Ingenieuren das Nonplusultra für die tägliche Rechenarbeit. Seine »Intelligenz« und sein hoher praktischer Nutzen erstaunen noch heute



BIOGRAFX, KEN EDWARD

Abdrücke von Molekülen

Mit einem neuen, einfachen Verfahren lassen sich Hohlformen von Molekülen in Kunststoffen erzeugen. Anwendungsmöglichkeiten liegen in der Pharmaforschung, Biomedizin und Nahrungsmittelindustrie

Dieser Artikel ist als 'Plus'-Artikel zur Ausgabe
» Spektrum der Wissenschaft, März 2007
nur Abonnenten der Zeitschrift zugänglich

präsentiert von www.mag-heaven.dl.am

Schnelllesetechniken

Die Informationsflut bändigen

Von Brigitta Ernst

Wer kennt das nicht: Zahlreiche E-Mails quellen schon morgens aus dem am Vorabend mühsam abgearbeiteten Posteingang. Permanent klingelt das Telefon, jeder will etwas von einem, und zwar sofort! Niemanden interessiert es, dass man dringend Ruhe bräuchte, um an einem wichtigen Projekt zu arbeiten. Oft ist das schlechte Gewissen ob der zahlreichen unerledigten »To dos« am Ende eines Arbeitstags groß, wenn man nicht weiß, wie man mit der Informationsflut richtig umgeht.

Das Gute an der heute gängigen Überschwemmung mit Daten und Informationen: Kaum etwas ist unwiederbringlich verloren. In Zeiten von Internet und weltweiter Vernetzung lässt sich praktisch jede gewünschte Information mit ein paar Mausklicks aktuell und in wenigen Minuten wiederfinden. Sie dürfen also getrost wählerisch sein mit dem, was Sie sich an Daten zuführen. So sollten Sie etwa Ihre seit Monaten ungelesenen Zeitungen endlich wegwerfen. Offenbar konnten Sie auch bisher überleben, ohne ihre Inhalte näher zu kennen. Auf diese Weise bereitet der Zeitungsstapel lediglich ein schlechtes Gewissen, ohne Nutzen zu bringen.

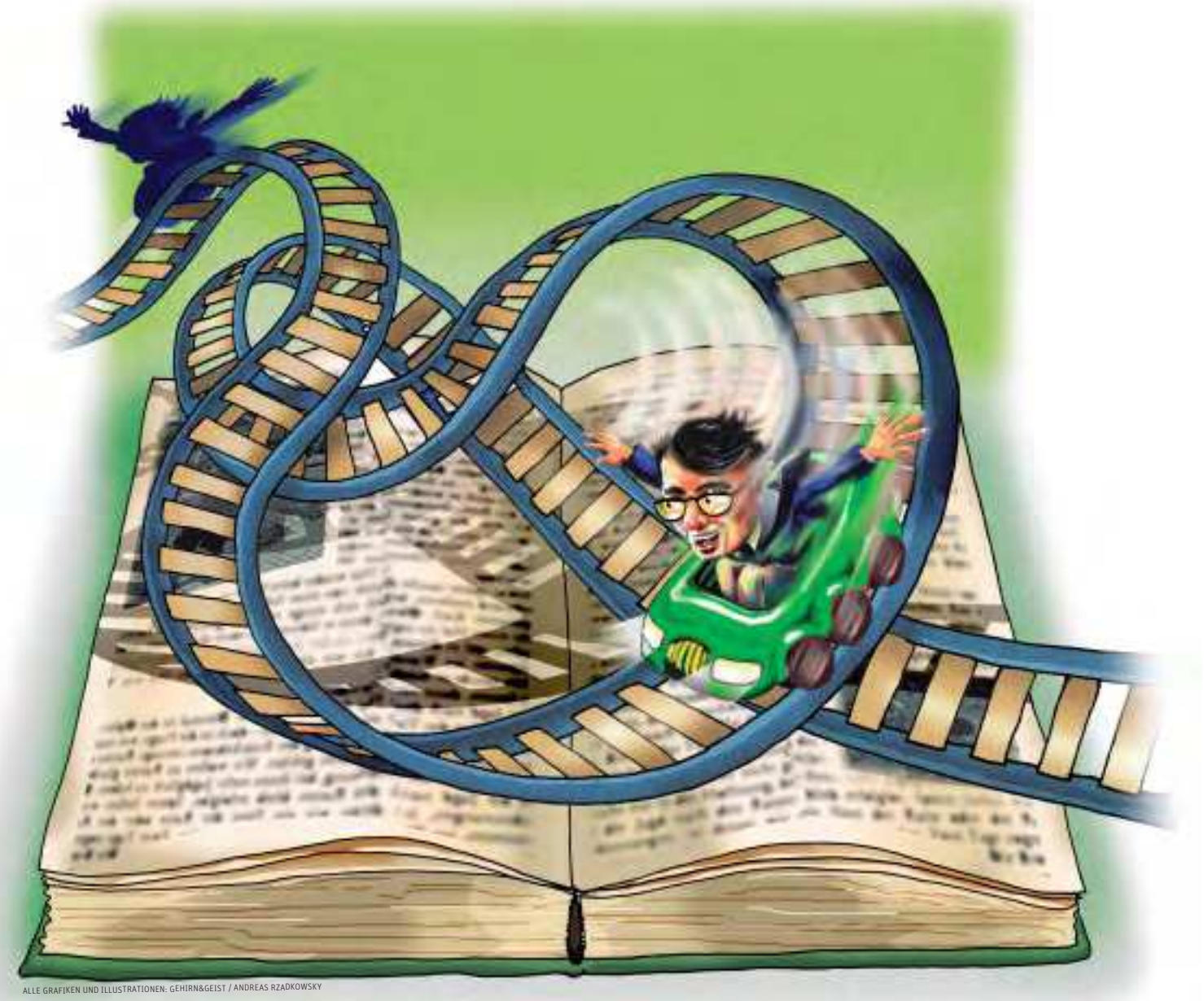
RUHIG WEG DAMIT!

Wenn Sie sich damit schwer tun, können Sie einen Zwischenschritt einlegen: einfach die Zeitungen zügig durchblättern und nur das rausreißen, von dem Sie sich nicht trennen möchten. Dabei sollte jedoch eine Frage immer eine Rolle spielen: Ist diese Information für Sie jetzt im Moment wichtig oder handelt es sich vielleicht um einen interessanten Artikel über ein Thema, das für Sie in ein paar Jahren relevant wird? Im letzteren Fall weg damit! Denn bis dahin gibt es viele aktuellere Artikel, auf die Sie zurückgreifen können.

Weil Sie jetzt nur noch einzelne Seiten und nicht mehr die ganzen Zeitungen vorliegen haben, wird nicht nur der Stapel dramatisch kleiner, Sie können diese Artikel auch leichter überallhin mitnehmen. Immer wenn Sie Leerlaufzeiten im Bus oder in der Bahn, im Stau, auf dem Amt oder beim Arzt erdulden – Sie haben Ihre Lektüre dabei und die Zeit damit sinnvoll überbrückt.

Sind die selektierten Informationen nach zwei Wochen jedoch noch immer nicht gelesen und Sie ertappen sich womöglich dabei, wie Sie beim Arzt lieber neuesten Promi-Klatsch lesen statt Ihrer mitgebrachten Artikel, haben Sie deshalb kein allzu schlechtes Gewissen – werfen Sie sie einfach weg. Offensichtlich waren sie doch nicht so wichtig. Schließlich darf man eines nicht vergessen: Parallel kommen ja ständig neue Informationen hinzu!

Allgemein gilt: Lesen Sie lieber zwei Texte zu einem Thema schnell als einen langsam. Sie bekommen in der gleichen Zeit mehr unterschiedliche Details gelie-



ALLE GRAFIKEN UND ILLUSTRATIONEN: GEHIRN&GEIST / ANDREAS RZADKOWSKY

fert. Man merkt dadurch auch schneller, welche Informationen wichtig sind und was man sich getrost schenken kann.

Wer effektiver mit Informationen umgehen möchte und gleich auf einen Blick wissen will, was relevant ist, der sollte daher vor allem daran arbeiten, schlechte Lesegewohnheiten abzulegen. Am häufigsten verbreitet ist die so genannte Regression – das Zurückspringen der Augen während des Lesens. Es kostet nur Zeit und bringt für das Behalten gar nichts. Um die Regression zu vermeiden, führen Sie einen Stift gezielt und zügig unterhalb der Zeile entlang, die Sie gerade lesen. Legen Sie dabei ein geringfügig schnelleres Tempo vor als Ihre übliche Lesegeschwindigkeit, und folgen Sie dabei dem Stift mit den Augen. Anfangs gestaltet sich das oft schwierig, da die ▷

***Mit der richtigen Lesetechnik** können Sie die dicksten Schmöker im Eiltempo durchpflügen und trotzdem die wesentlichen Inhalte aufnehmen.*

▷ Augen immer wieder zurückspringen wollen. Seien Sie nicht ungeduldig – schließlich haben Sie jahrelang anders gelesen. Versuchen Sie es einfach immer wieder.

Denn es ist ein weit verbreiteter Irrtum zu glauben, langsames Lesen sei mit sorgfältigem Lesen gleichzusetzen. Für das Gehirn und somit das bessere Verständnis ist es wichtig, Informationen erst einmal in einem Kontext aufzunehmen und dann in einem zweiten Schritt noch einmal zu vertiefen, falls noch Fragen offen sind. Ist etwas zunächst verwirrend, klärt es sich häufig beim weiteren Lesen des Textes. Das Gehirn setzt die fehlenden Informationen zusammen wie ein Puzzle. Schaut man immer nur ein einzelnes Teilstück davon an, wird man es nicht verstehen – egal, wie oft man es liest.

JE VERTRAUTER, DESTO SCHNELLER

Sobald Sie diese Vorgehensweise im Griff haben, können Sie einen Schritt weiter gehen und spezielle Schnelllesetechniken anwenden. Hiervon gibt es ganz unterschiedliche, und jeder, der viel lesen muss, wendet in der Regel schon unbewusst eine oder mehrere davon an. So werden viele automatisch die Lesegeschwindigkeit dem Text anpassen. Ist einem die Materie vertraut, liest man ihn zügig durch; das Gehirn erkennt Bekanntes wieder. Kommt ein Detail, das neu oder sehr komplex ist, drosselt man automatisch die Lesegeschwindigkeit etwas. Erscheint hingegen eine völlig fremde Information, so liest man diese sehr langsam. Denn es gibt in Ihrem Gedächtnis noch nichts, was Sie mit dem eben Gelesenen in Zusammenhang bringen könnten.

Die einfachste Schnelllesetechnik ist die 2-Punkt-Technik, die der Engländer Tony Buzan entwickelt hat. Hierbei werden die Informationen zu sinnvollen Einheiten zusammengefasst, statt jedes einzelne Wort zu lesen. Man nimmt also gleich mehrere Worte auf einmal auf. Am besten lässt sich dies beim täglichen Zeitunglesen üben. Versuchen Sie, nicht jedes einzelne Wort zu fokussieren, sondern nur ein- bis zweimal pro Zeile mit den Augen Halt zu machen. Beim anfänglichen Üben sollte man sich nicht darauf versteifen, immer gleichmäßig viele Worte aufzunehmen, und stattdessen der natürlichen Bewegung der Augen nachgeben.

Zu Beginn kann man wieder einen dünnen Stift zu Hilfe nehmen. In diesem Fall lassen Sie ihn in der Mitte der Zeile gerade nach unten wandern. Versuchen Sie dabei, die Augen folgen zu lassen. Bei langen Zeilen hilft es anfangs zu versuchen, mit den Augen einen Bogen zu machen. Das bewahrt Sie davor, dass die Augen zurückspringen. Diese Technik des Schnelllesens ist zwar die am wenigsten durchschlagende, lässt sich jedoch am einfachsten trainieren. Es gibt andere Methoden, bei denen etwa in einer Schleife von hinten nach vorne gelesen wird – dafür braucht man aber wesentlich mehr Übungszeit.

Am Anfang wird es etwas dauern, bis sich Ihre Augen an die neue Bewegung gewöhnt haben. Deshalb wird zu Beginn nicht so viel Inhalt hängen bleiben: Ihr Augenmerk ist auf das Erlernen der Technik gerichtet. Üben Sie daher am besten als Erstes bei Informationen, die Sie zwar lesen möchten, jedoch nicht wirklich dringend brauchen, wie beispielsweise die Tageszeitung oder die oben beschriebenen angesammelten Informationsberge.

Wichtig sind hierbei auch die äußeren Bedingungen. Achten Sie auf ausreichendes Licht; am besten Tageslicht. Legen Sie die Leseaktivität in die Zeit, in der Ihre persönliche Leistungskurve oben ist. Sorgen Sie dafür, dass Sie nicht gestört werden. Auch sollte der Raum nicht zu warm sein, damit Sie nicht schläfrig werden.

Besonders im Berufsalltag gibt es immer wieder mehr oder weniger dicke Fachbücher, die man lesen muss. Hier ist es wichtig, sich richtig zu motivieren (also: Was habe ich davon, wenn ich diesen Wälzer durchackere?), sonst fällt das Behalten der Texte schwer. Außerdem sollten Sie sich im Voraus überlegen, wie viel Zeit Sie investieren möchten. Das hilft, Ihren Fokus auf das Wesentliche zu konzentrieren und sich nicht mit etwas zu verzetteln, was Sie ohnehin nicht lesen wollen.

Wenn es darum geht, ein Buch zu einem Thema durchzuarbeiten, sind folgende Ratschläge hilfreich:

▶ **Verschaffen Sie sich als Erstes einen Überblick.** Lesen Sie zuerst Klappentext, Inhaltsverzeichnis und Vorwort. Blättern Sie das Buch einmal zügig durch. Beschränken Sie sich darauf, nicht länger als wenige Sekunden auf einer Doppelseite zu verweilen, sonst laufen Sie Gefahr sich festzulesen. Überfliegen Sie nur Überschriften, Grafiken, Infokästen, Zwischenüberschriften und andere auffällige Elemente.

▶ **Testen Sie den Schreibstil des Autors.** Liegt er Ihnen oder bereitet er Ihnen Mühe? Vielleicht gibt es ein anderes Buch zum Thema, das Ihnen besser gefällt?

▶ **Wenn Sie beim Durchblättern innerlich ein Unbehagen verspüren,** weil Ihnen vielleicht das Layout oder die Schriftgröße nicht gefällt, legen Sie das Buch zur Seite und suchen Sie eine Alternative. Dieses Werk würden Sie wahrscheinlich ohnehin nicht zu Ende lesen.

▶ **Trennen Sie sich von dem herkömmlichen Denken**, das besagt: Ein Buch muss von vorne nach hinten gelesen werden. Das stimmt nur bei einer erzählerischen Handlung. Lesen Sie sonst nur die für Sie wichtigen Passagen. Wenn Sie die anderen zu einem späteren Zeitpunkt benötigen, können Sie diese dann bearbeiten.

Eine weitere Quelle für Informationen sind heutzutage E-Mails und elektronische Newsletter. Überlegen Sie sich genau, welche Newsletter Sie wirk-

lich brauchen, und melden Sie sich nicht wahllos bei allen Informationsforen an. Ein Spamfilter ist inzwischen geradezu Pflicht, wenn man nicht gerade eine ganz neue Mailadresse hat – und selbst dann ist es nur eine Frage der Zeit (und des Surfens im Internet), bis die ersten unerwünschten Werbemails eintrudeln.

MIT GUTEM BEISPIEL VORANGEHEN

Auch beim Lesen der E-Mails sollten Sie sich einer Schnelllesetechnik bedienen. Manchmal steht schon in der Betreffzeile, worum es geht; das spart Zeit. Oft ist nach den entscheidenden Sätzen noch massenhaft Werbung oder Unternehmensinformation unter PS mitgeliefert. Darauf kann man in der Regel völlig verzichten. Sind die Mails sehr lang und in breiten Zeilen geschrieben, kann man sie in ein Worddokument kopieren und hier den Zeilenabstand auf fünf oder sechs Zentimeter schieben. So lässt sich die 2-Punkt-Lesetechnik leichter anwenden.

Übrigens: Wer über den Datenmüll der anderen schimpft, sollte selbst darauf achten, keinen zu produzieren. Das lässt sich mit ein paar einfachen Regeln bewerkstelligen:

- **Schreiben Sie in die Betreffzeile,** worum es geht. Das hilft dem Empfänger, sich gleich zu orientieren, noch ehe er die Mail geöffnet hat.

- **Fassen Sie sich kurz.** Sagen Sie vor allem genau, was Sie vom Empfänger erwarten und bis wann.

- **Leiten Sie nur Mails an Empfänger weiter**, die direkt in ein Projekt oder Thema involviert sind, und verschicken Sie diese nicht »Zur Kenntnis« an viele andere in der Abteilung. Das spart Zeit und Nerven.

- **Ehe Sie für eine Verabredung** diverse Ein-Satz-Mails hin- und herschicken, greifen Sie lieber zum Telefon. Das geht meist schneller, vermeidet Missverständnisse und einen überlaufenden E-Mail-Eingang. ◀

autorin / literatur / weblink

Brigitta Ernst ist Journalistin, Buchautorin und gibt Seminare zum Thema Speedreading und persönliches Informationsmanagement.

Ernst, B. E.: Der Wissensgourmet. Heidenheim: Cognitum Wirtschaftsverlag 2006.

www.wissensgourmet.de

ANZEIGE

Konzentrierter. Ausgeglichener. Belastbarer.

Was mein Gehirn zum Denken braucht.

Unser Gehirn ist die Schaltzentrale des Lebens: Es organisiert unsere geistige Leistungsfähigkeit, das Denkvermögen, die Konzentration. Ein Netzwerk aus 100 Milliarden Gehirnzellen – und jede Zelle eine Energiequelle, die wir besser nutzen können. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration.

Unsere Konzentration ist abhängig von der Energieleistung der Mitochondrien. Diese „Kraftwerke" in den Gehirnzellen versorgen uns jeden Tag mit neuer Energie. Auf diese natürliche Energie-Produktion der Gehirnzellen kann man heute gezielt einwirken und **die Gehirnleistung „ankurbeln".** Genau dafür wurde **Tebonin®** mit dem exklusiven Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761® entwickelt. **Tebonin®** schützt die Mitochondrien vor Leistungsabfall, ihre Energieversorgung bleibt aktiv. Selbst angegriffene Zellen können wieder regeneriert werden. So wird auf natürliche Weise Ihre **geistige Leistungsfähigkeit gesteigert.**

Nach wenigen Wochen werden Sie feststellen: Sie sind **konzentrierter und die Gedächtnisleistung nimmt zu.** Besser belastbar meistern Sie die Anforderungen des Alltags leichter und sind ausgeglichener. Kurz: Sie haben **spürbar mehr Gehirnleistung** – auch andere werden es merken.
Fragen Sie noch heute Ihren Apotheker nach **Tebonin®**. Er wird Sie gerne beraten.

www.tebonin.de

Tebonin® intens 120 mg Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei durch altersbedingte Arterienverengung hirnorganisch bedingten geistigen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit und Konzentration, Kopfschmerzen, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Hinweise: Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.** Stand: 01/07 T/01/07/5/1